



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ELINA MÄKI
KESKISUURTEN JA PIENTEN KULUTTAJIEN KYSYNTÄJOUSTON
LAITTEET JA KANNATTAVUUS

Diplomityö

Tarkastaja: professori Pertti Järventausta
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
30. toukokuuta 2018

TIIVISTELMÄ

ELINA MÄKI: Keskisuurten ja pienten kuluttajien kysyntäjoustop laitteet ja kannattavuus

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 54 sivua

marraskuu 2018

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Sähköverkot ja -markkinat

Tarkastaja: professori Pertti Järventausta

Avainsanat: kysyntäjousto, etäluettavat sähkömittarit, sähkömarkkinat, kodin energiahallintajärjestelmät

Sähköntuotannossa on käynnissä muutos, jossa Euroopan Unionin ja kansallisten toimijoiden asettamat energiatavoitteet vaativat uusiutuvan energian kasvua. Uusiutuva sähköntuotanto on hyvin sääriippuvaista, eikä se ole yhtä säädetävissä kuin perinteiset voimalaitokset, jotka ovat vähitellen poistumassa sähköntuotannosta. Tämä asettaa haasteita sähkövoimajärjestelmälle, jonka toiminta vaatii kulutuksen ja tuotannon tasapainoa joka hetki.

Yhtenä vastauksena sähkövoimajärjestelmän toimivuuden varmistamiseen on kysyntäjoustop lisääminen. Kysyntäjoustopissa kuormaa säädetään tuotannon ja kulutuksen tasoittamiseksi. Perinteisesti kysyntäjoustopia on enimmäkseen hyödyntänyt suurteollisuus, mutta nyt on myös kiinnostuttu keskisuurten ja pienten kuluttajien saamisesta kysyntäjoustopin piiriin.

Tässä diplomityössä selvitetään, mitä laitteita pienten ja keskisuurten kuluttajien kysyntäjoustopiin voisi käyttää ja miten laitteet soveltuisivat eri kysyntäjoustopin markkinapaikoille. Työtä varten haastateltiin viittä eri toimijaa, jotka olivat etäluettavien energiakulutusmittareiden, kodin energiahallintajärjestelmien tai sähkönlaatumittareiden valmistajia. Laitteiden teknisten ominaisuuksien lisäksi heiltä kysyttiin näkemyksiä kysyntäjoustopin tulevaisuudesta. Pääsääntöisesti laitteilla pystyisi osallistumaan Elspot- ja Elbas-markkinoille, mutta teknisesti vaativammille Fingridin reservimarkkinoille osallistuminen vaatii vielä tuotekehitystä. Erityisesti sähkömittarivalmistajat odottavat laitteita koskevia toiminnallisia vaatimuksia, joita Työ- ja elinkeinoministeriön asettama alan toimijoista koostuva Älyverkkotyöryhmä tulee ehdottamaan.

Tässä diplomityössä arvioitiin pienten ja keskisuurten kuluttajien kysyntäjoustopin taloudellista kannattavuutta sähkönmyyjien näkökulmasta. Vaikka tehdyt laskelmat eivät suoraan todista kannattavuutta tulevaisuudessa, pienkuluttajien hyödyntäminen kysyntäjoustopissa on taloudellisesti haastavaa. Kysyntäjoustopiin osallistumisen voi odottaa kasvavan laitteiden teknisten vaatimusten selkeytyessä ja markkinapaikkojen ehtojen muuttuessa. Lisäksi kysyntäjoustopin kannattavuutta voi hakea pitämällä yksittäisten kulutuskohteiden reaaliaikamittausten määrän pienenä ja kehittämällä sähkönkulutuksen mallinnusta.

ABSTRACT

ELINA MÄKI: Available devices and economic viability of demand response for small and medium-sized consumers
Tampere University of Technology
Master of Science Thesis, 54 pages
November 2018
Master's Degree Programme in Electrical Engineering
Major: Power Systems and Market
Examiner: Professor Pertti Järventausta

Keywords: Demand response, Automatic meter reading, AMR, electricity markets, home energy management systems, HEMS

A transition is happening in the electricity production. New goals set by the European Union and national entities related to energy usage and production require the use of renewable energy to increase. Renewable energy production is highly weather dependent and less controllable than traditional power plants that are also being shut down.

One solution for ensuring a stable power system is to increase the use of demand response in the electricity markets. In demand response, the consumption is altered in order to balance the production and consumption. Traditionally only large industrial sites have utilized demand response. Nowadays it is a common interest to include small and medium scale consumers in demand response.

In this M.Sc Thesis work analysis was completed regarding devices for small and medium scale consumers and how they could be used to participate in the demand response in different markets. Five different companies were interviewed for the thesis. The interviewed companies are either manufacturers of AMR meters or home energy management systems. Interviews included questions about both technical questions on devices and views about the future of demand response.

Most of the devices were able to operate on both day-ahead Elspot and intra-day Elbas markets. Operating in the more technically demanding Fingrid's reserve markets still require improvements in the devices. The AMR meter manufacturers specifically are waiting for guidelines regarding the devices from the Finnish Ministry of Economic Affairs. The ministry has created a smart grid workgroup to specify the guidelines.

Economic viability is required for demand response to become more common. In the thesis the economic viability of small- and medium-sized consumers' demand response in different markets was analyzed from the electricity seller point of view. Based on the analysis small-sized consumers' participation in demand response is financially challenging. Fast moving technological development will likely increase the demand response participation for small-sized consumers. In addition it is possible to improve the economic viability of small-scale consumers' demand response by developing load modeling and keeping the amount of real time measurements smaller.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	SÄHKÖMARKKINAT	3
2.1	Sähköntuotanto Suomessa.....	3
2.2	Sähkön tukku- ja vähittäismarkkinat.....	5
2.3	Markkinahinnan muodostuminen.....	6
3.	KYSYNTÄJOUSTO.....	8
3.1	Markkinaperusteinen kysyntäjousto.....	10
3.2	Teollisuuden kysyntäjoustopotentiaali.....	10
3.3	Pienasiakkaan kysyntäjousto.....	10
3.4	Aggregaattorit.....	11
4.	KYSYNTÄJOUSTON MARKKINAPAIKAT	13
4.1	Nord Pool Spot.....	13
4.1.1	Elsport-markkinat	14
4.1.2	Elbas-markkinat	15
4.2	Fingridin reservituotteet	15
4.2.1	Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR)	17
4.2.2	Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N) ja taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D)	19
4.2.3	Automaattinen taajuudenhallintareservi (aFRR)	20
4.2.4	Tehoreservi.....	22
4.3	Reservien ansaintamallit	23
4.3.1	Taajuusohjattu käyttöreservi	23
4.3.2	Taajuusohjattu häiriöreservi.....	23
4.3.3	Säätösähkömarkkinat	23
4.4	Markkinapaikkojen kehitysnäkymiä	24
5.	KYSYNTÄJOUSTON LAITTEISTOT	27
5.1	Automaattinen mittarinluenta (AMR).....	27
5.2	Kodin energiahallintajärjestelmä (HEMS).....	31
5.3	Alan toimijoita.....	32
5.3.1	Landis+Gyr Oy	32
5.3.2	Kamstrup A/S.....	33
5.3.3	MX Electrix Oy.....	35
5.3.4	OptiWatti Oy.....	36
5.3.5	There Corporation Oy	38
5.4	Yhteenveto toimijoista	40
6.	KYSYNTÄJOUSTON KANNATTAVUUS.....	41
7.	YHTEENVETO	47
	LÄHTEET	49

LYHENTEET JA MERKINNÄT

aFRR	engl. Automatic Frequency Restoration Reserve, automaattinen taajuudenhallintareservi
AMR	engl. Automatic Meter Reading, etäluettava sähkömittari
BACS	engl. Building Automation and Control Systems, kiinteistöautomaatiojärjestelmä
CHP	engl. Combined Heat and Power, sähkön ja lämmön yhteistuotanto
CNS	engl. Carbon Neutral Scenario, hiilineutraali ennuste
FCR-D	engl. Frequency Containment Reserve for Disturbances, taajuusohjattu häiriöreservi
FCR-N	engl. Frequency Containment Reserve for Normal operation, taajuusohjattu käyttöreservi
HEMS	engl. Home Energy Management System, kodin energiahallintajärjestelmä
mFRR	engl. Manual Frequency Restoration Reserve, säätösähkömarkkinat
TEM	Työ- ja elinkeinoministeriö

1. JOHDANTO

EU:n energiatavoitteena on laskea vuoteen 2020 mennessä hiilidioksidipäästöjä ainakin 20 % vuoden 1990 tasosta, nostaa uusiutuvien tuotantomuotojen osuutta energiatuotannosta 20 % tuotannosta sekä parantaa energiatehokkuutta 20 %. Vuoteen 2030 mennessä tavoitteena on laskea päästöjä 40 % vuoden 1990 tasosta, nostaa uusiutuvien tuotantomuotojen osuutta 27 % kulutuksesta ja lisätä energiatehokkuutta 27–30 %. Tavoitteiden lisäksi EU (ja Suomi) ovat sitoutuneet Pariisin ilmastopöytäkirjaan, jonka tavoitteena on rajoittaa keskilämpötilan kasvu alle 1,5 asteeseen. Näiden lisäksi Suomen hallituksen ohjelmassa on asetettu tavoitteeksi kasvattaa uusiutuvan energian käyttöä yli 50 %:iin Suomen energiantuotannosta sekä luopua hiilen käytöstä energiantuotannossa. [1, 2, 3]

EU:n energiatavoitteet uusiutuvan sääriippuvan tuotannon lisäämiseksi ja Pariisin ilmastopöytäkirja sekä Suomen hallituksen tavoitteet asettavat haasteita sähkövoimajärjestelmän tehtämissä hallinnalle. Sähkövoimajärjestelmän kulutuksen ja tuotannon tulee aina olla yhtä suuret. Jos kulutuksessa ja tuotannossa on eroa, vaikuttaa ero voimajärjestelmän taajuuteen. Taajuuden poikkeama sallitusta (sallittu vaihteluväli on 49,9 Hz – 50,1 Hz) aiheuttaa nopeasti ongelmia sähkövoimajärjestelmässä, minkä takia tehtämissä on huolehdittava. [4] Perinteisesti sähkövoimajärjestelmän tehtämissä on turvattu pääasiassa tuotantoa säätämällä. Suuri osa säätövoimasta tuotetaan nykyisellään vesivoimalla tai tuodaan muista Pohjoismaista, joissa on helposti säädettävää vesivoimaa. [5] Perinteiset tuotantomuodot, kuten hiilivoima ja ydinvoima, tuottavat sähköä tasaisesti, jolloin säätövoimakapasiteetti pystytään arvioimaan suhteellisen hyvin. Uusiutuvan energiatuotannon osuuden kasvaessa tuotantokapasiteetista säätövoimaa tarvitaan enemmän, sillä uusiutuvan energiantuotannon tuottama teho vaihtelee huomattavasti enemmän. Säätötarpeen on ennustettu kasvavan kaksinkertaiseksi vuoteen 2030 mennessä. [6] Säätövoimakapasiteetin lisääminen esimerkiksi vesivoimaa lisäämällä on haastavaa, sillä Suomessa ei ole enää huomattavaa määrää hyödyntämätöntä vesivoimaa. Vesivoimapotentiaalia on jonkin verran hyödynnettävissä, mutta pääosin pienvesivoiman kohteina, joiden taloudellinen kannattavuus aiheuttaa haasteita. [7] Samalla myös olemassa olevaa lämpövoimaan perustuvaa sähköntuotantoa poistuu. Suomessa purettiin vuosina 2015–2017 2450 MW voimalaitoskapasiteettia. [6]

Tuotannon säädön sijaan säätö voi tapahtua myös kysyntää säätämällä. Kysynnän joustaminen on erittäin potentiaalinen säädön lähde. Suurteollisuus, kuten metsä-, metalli- ja kemianteollisuus, on toiminut tehtämissäreservinä jo pitkään. [8] Pienten kuluttajien joukko on pitkään ollut pääasiassa esimerkiksi päivä- ja yösähkön hyödyntämistä. Ennalta määrättyyn kellonaikaan porrastettu sähkön päälle- ja poiskytkentä eivät kuitenkaan vastaa markkinatilannetta eivätkä kykene reagoimaan uusiutuvan energian tuotannon

muutokseen nopeasti. Pienkuluttajien älykkäiden sähkömittareiden käyttöönotto sekä laitteiden teknologinen ja hinnan kehitys ovat mahdollistaneet tarkan kulutuksen seurannan sekä kuorman ohjauksen. Näin pienkuluttajille on tullut mahdolliseksi osallistua kysyntäjoustoon etenkin sähkön tuntimarkkinoilla.

Pienet ja keskikokoiset kuluttajat pystyvät jo osallistumaan kysyntäjoustoon sähkön tuntimarkkinoilla, mutta pienille ja keskikokoisille kuluttajille olisi myös mahdollista osallistua reservimarkkinoille, mikäli kulutusta koottaisiin virtuaalisesti yhteen erillisten aggregaattorien toimesta. Aggregaattorit koostaisivat kuluttajien ohjattavaa kuormaa yhdeksi kokonaisuudeksi, jolloin aggregaattorit kykenisivät osallistumaan esimerkiksi Fingridin säätösähkömarkkinoille, joissa säädettävä minimikapasiteetti on 5-10 MW riippuen säädön aktivointitavasta. [9] Tämä mahdollistaisi uusien ansaintamallien kehityksen pienille ja keskikokoisille kuluttajille, jotka eivät yksinään kykene tarjoamaan riittävää säätökapasiteettia. Lisäksi teknologian kehittyessä pienet ja keskikokoiset kuluttajat pystyvät myös osallistumaan muille Fingridin kapasiteettimarkkinoille, kuten taajuussäätöön, joissa tekniset vaatimukset esimerkiksi kuormanohjauksen aktivointijasta ovat huomattavasti säätösähkömarkkinoita vaativammat.

Tässä työssä on tarkoituksena selvittää, millaiset mahdollisuudet pienillä ja keskisuurilla kuluttajilla on osallistua kysyntäjoustoon. Työssä käsitellään eri markkinapaikkojen nykyisiä tai pian voimaantulevia vaatimuksia markkinoille tarjotun kuorman suuruudesta ja ohjausnopeudesta. Näitä vaatimuksia heijastetaan kysyntäjoustossa hyödynnettävien laitteiden, esimerkiksi etäluettavien sähkömittareiden, ominaisuuksiin. Lisäksi selvitetään, kuinka kannattavaa kysyntäjousto on sähkönmyyjälle hyödyntäen tarjottavassa kuormassa pieniä ja keskisuuria kuluttajia.

Luvussa 2 esitellään Suomen sähkömarkkinat yleisellä tasolla. Esittely aloitetaan sähkön tuotannon nykyisellä tilanteella ja sen arvioidusta kehityssuunnasta. Sen jälkeen kerrotaan sähkön tukku- ja vähittäismarkkinoista sekä hinnan muodostumisesta. Kolmannessa luvussa käsitellään kysyntäjouston teoriaa eli kuinka paljon kysyntäjoustoa on eri markkinoilla sekä miten teollisuuden ja pienasiakkaan kysyntäjousto eroavat toisistaan. Luvun 4 aihe on sähkön eri markkinapaikat kertoen näiden toimintaperiaatteen ja kaupankäynnin ehdot. Lisäksi käsitellään markkinapaikkojen mahdollisia kehitysnäkymiä ja ansaintamalleja. Luvussa 5 esitellään kysyntäjouston kannalta tärkeät laitteet, etäluettavat sähkömittarit ja kodinenergihallintajärjestelmät. Luvussa myös kerrotaan yksityiskohteisemmin muutaman eri toimijan laitteista. Luvussa 6 arvioidaan luvuissa 4 ja 5 saatujen tietojen perusteella, kuinka taloudellisesti kannattavaa kysyntäjousto on sähkönmyyjälle, kun osallistutaan taajuusohjatulle häiriöreserviin ja säätösähkömarkkinoille erilaisilla aggregoiduilla kuormilla.

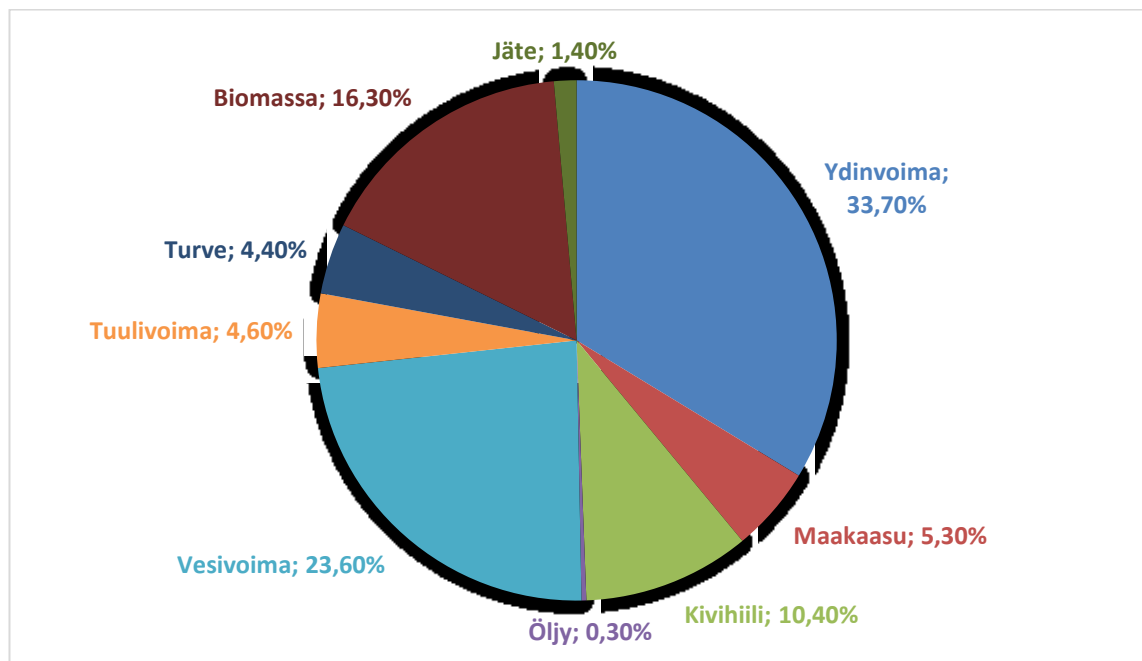
2. SÄHKÖMARKKINAT

Tässä luvussa on esitelty lyhyesti sähköntuotannon rakennetta Suomessa. Tällä on osaltaan vaikutusta markkinahinnan tasoon ja näin myös kuluttajasähkön hintaan.

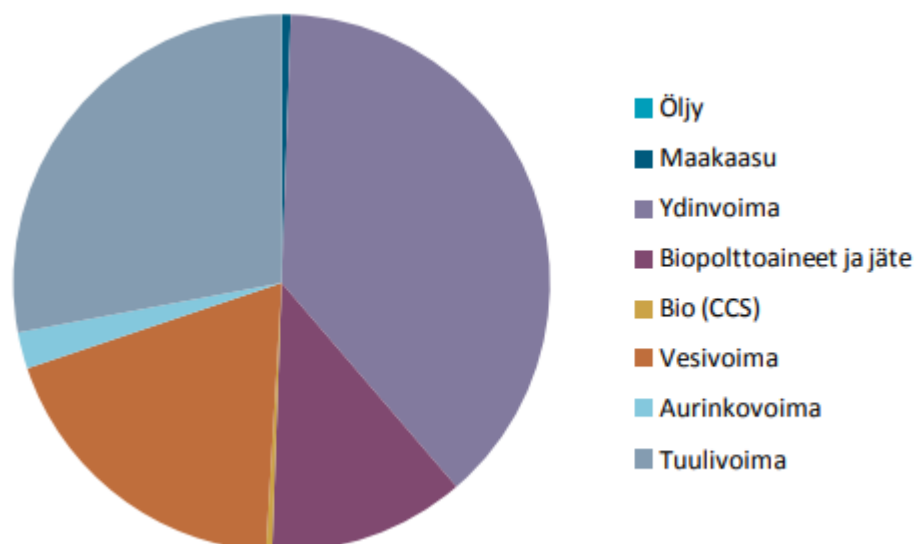
2.1 Sähköntuotanto Suomessa

Suomen sähköntuotanto koostuu monipuolisesti eri tuotantolähteistä. Ydinvoima ja uusiutuvista energialähteistä vesivoima ja biomassa kattavat huomattavan osan sähköntuotannosta. Huippukulutushetkinä käytetään myös kivihiiltä ja maakaasua kattamaan sähkön kulutustarpeet. Vesivoiman osuus vaihtelee huomattavasti riippuen vesitilanteesta. Muut uusiutuvat energialähteet ovat vielä pienessä osassa. Kuvassa 2.1 on esitetty Suomen sähköntuotannon primäärienergianlähteet vuonna 2016. [10]

Tuulivoiman ja aurinkosähkön osuus on vielä pientä, mutta niiden osuus kasvaa jatkuvasti. Uusiutuvien energialähteiden osuus tuotannosta kasvaa huomattavasti tulevaisuuden ennusteissa. Kuvassa 2.2 on kuvattu arvio siitä, miten Suomessa sähkö tuotetaan vuonna 2050. Arvio on tehty oletuksella, että toimitaan CNS- eli Carbon Neutral Scenario –skenaariossa. Tämä tarkoittaa Suomen kehittävän sähköntuotantomuotojaan siten, että hiilidioksidipäästöt vähenevät ja loputkin päästöt kompensoidaan sitomalla hiiltä ilmasta. Tällä skenaariolla merkittävimpiin sähköntuotannon energialähteisiin ydin- ja vesivoiman rinnalle nousee tuulivoima. Myös aurinkovoiman osuus kasvaa suuremmaksi kuin maakaasun ja öljyn osuudet. [11]



Kuva 2.1 Sähköntuotanto Suomessa vuonna 2016 [10]



Kuva 2.2 Työ- ja elinkeinoministeriön arvio Suomen sähköntuotannosta energialähteittäin vuonna 2050 CNS-skenaariossa [11]

Suomen sähköntuotantoa säädetään kulutuksen mukaan, joka vaihtelee niin vuodenajan kuin vuorokaudenajan mukaan. Sähköntuotantomenetelmät voidaan jakaa voimalaitoksen käyttötavan mukaan perusvoimaan, huippuvoimaan, varavoimaan ja säätövoimaan, vaikka jaottelulla ei ole ollut virallista roolia sähkömarkkinan avautumisen jälkeen. [12]

Perusvoimalla tuotetaan sähköä tasaisesti ja ennakoitavia määriä. Tyypillisenä esimerkkinä perusvoimana käytetystä tuotannosta ovat ydinvoima ja osa vesivoimasta. Huippuvoimalla osallistutaan kulutushuippujen kattamiseen, jolloin vuosittain niitä käytetään varsin lyhyitä aikoja. Yleensä huippuvoimalaitokset ovat hiili- ja öljylaitoksia sekä kaasuturbiinit. Varavoimaa voidaan tuottaa samassa laitoksessa kuin huippuvoimaa. Sitä käytetään korvaamaan perusvoimaa, joka on poissa käytössä vian tai huollon takia. [12]

Säätövoima voi toimia säätömarkkinoille osallistuvana tuotantona tai joustavana tuotantokapasiteettina, jolla kompensoidaan esimerkiksi tuulivoimatuotannon vaihtelua. Säätövoimatuotannossa käytetään ensisijaisesti joustavaa vesivoimatuotantoa. Ilmastojen ja energiapolitiikka on vaatinut uusiutuvien energiatuotantomuotojen tuulivoima- ja aurinkosähkötuotannon lisäämistä, mikä tekee säätövoiman tarpeesta vielä kriittisempää. Tarvittavaa sähköntuotantoa on kompensoitu myös tuontisähköllä, mutta koska tuulivoiman lisäämistä on suunniteltu myös Ruotsissa ja Manner-Euroopassa, Suomi ei voi luottaa tuontisähkön kattavan tulevaisuudessa sähköntuotannon vaihteluita samoin kuin nykyään. [12]

Tilanteissa, joissa sähkön korkeaan kulutukseen ei voida vastata normaalisti käytössä olevilla omilla voimalaitoksilla tai sähköpörssin markkinatarjonnalla, otetaan käyttöön tehoreservit. Näin turvataan sähköntoimitus kaikkina hetkinä. Energiamarkkinavirasto valitsee tehoreservin voimalaitosyksiköt tarjouksilpailun kautta. [12]

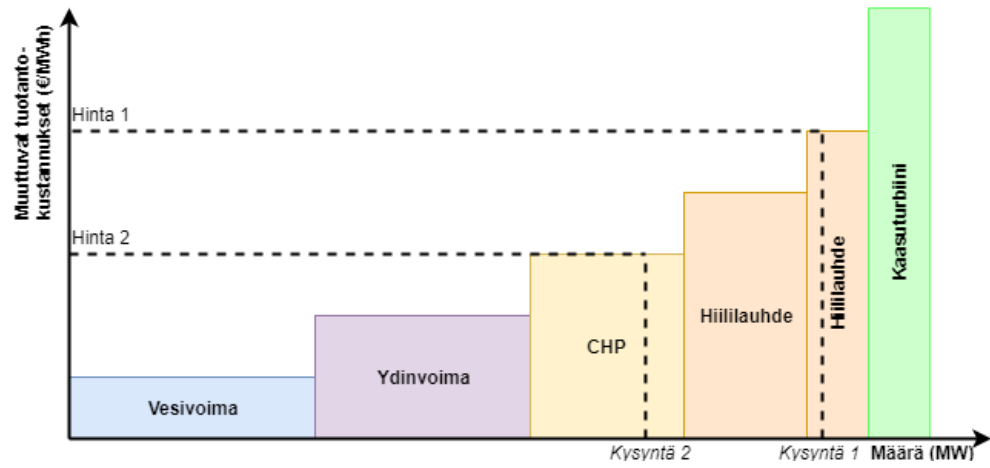
Kaupankäynnissä hyödynnetään NordPool-sähköpörssiä, jossa tärkeässä roolissa on seuraavan päivän vuorokausimarkkina, Elspot. Elspot-markkinoilla päätetään seuraavan päivän sähkönhinnat tuntikohtaisesti suljetulla huutokaupalla tarkoituksena tasata sähkön tuotanto ja kulutus. Markkinoiden sulkeuduttua avautuu Elbas-markkinat, jolla jatketaan tuotannon ja kulutuksen suhteen tasaamista Elspot-markkinoiden jäljiltä. [14]

Kuluttajat ostavat sähkönsä sähkönmyyjiltä vähittäismarkkinoilta. Yleensä vähittäismarkkinoilla sähkö myydään kuluttajille kiinteään hintaan, kun tukkumarkkinoilla hinta muuttuu tunneittain. Kuluttajat pystyvät näin suojautumaan sähkön markkinahinnan muutoksilta. Kiinteähintaisessa sopimuksessa hinta muodostuu kuitenkin niin, että vähittäismarkkinoilla toimivat sähkön myyjät kattavat hankintakustannuksensa pidemmällä aikavälillä. Nykyään on tosin mahdollista valita sähkösopimus, jossa sähkönhinta perustuu sähkön tukkumarkkinahintaan. [14]

Itse kulutetun sähkön lisäksi sähköstä maksetaan myös siirtomaksut ja verot. Useimmiten siirtomaksu koostuu energiankulutukseen pohjautuvasta energiaosuudesta ja perusmaksusta. Tosin on pohdittu siirtomaksun muuttamista tehohinnoittelumalliin, jossa osa perusmaksusta määräytyisi kulutuksen tehohuipun mukaan. [16] Muutamat suomalaiset sähköverkkoyhtiöt ovat jo alkaneet soveltaa tehotariffia myös pienasiakkaille [17]. Kuluttajan maksuista noin kolmasosa on sähköenergiamaksuja, toinen kolmasosa siirtomaksuja ja viimeinen kolmasosa veroja [18].

2.3 Markkinahinnan muodostuminen

Vaikka pienkuluttajalla sähkön hinta on usein sama joka tunnilla, sähkön markkinahinta muuttuu joka tunti. Ensimmäinen markkinahintaan vaikuttava asia on kysynnän ja tarjonnan suhde. Kuvassa 2.4 on kuvattu markkinahinnan määräytyminen tukkusähkömarkkinoilla. Kuvassa on esitetty markkinahinnan määräytyminen kahdessa eri tilanteessa. Tilanteessa 1 kulutus on korkeammalla, jolloin osa tuotannosta pitää halvempien tuotantomuotojen lisäksi tuottaa hiililauhteella. Hinta muodostuu kalleimman tuotantomuodon mukaan, jolloin hinta on tilannetta 2 korkeampi. Vastaavasti tilanteessa 2 kulutus on pienempää, jolloin hiililauhdevoimaloita ei tarvitse ja hinta muodostuu halvemman tuotantomuodon perusteella (CHP, Combined heat and power, sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitos). Sähkön hintaan vaikuttaa vahvasti se, miten sähkö on tuotettu. Luonnollisesti tästä seuraa, että sähkö pyritään tuottamaan mahdollisimman edullisella tuotantotavalla.



Kuva 2.4 Sähkön tukkuhinnan muodostuminen [19]

3. KYSYNTÄJOUSTO

Sähköntoimitusvarmuutta voidaan lisätä myös kysyntäjoustolla. Siinä, missä tuotantolaitokset tuottavat sähköä kysyntää varten, kysyntäjoustolla vähennetään kulutusta tunneilta, jolloin sähkön hinta on kallista. Nämä ovat yleensä myös tehohuipun tunteja, jotka ovat verkon tehotasapainon ja taajuuden kannalta kriittisiä. Kalliilta tunneilta vähennetty sähkönkulutus voidaan siirtää edullisimmille tunneille. Siirto ei välttämättä edes näy kuluttajalle, jos ohjataan esimerkiksi lämminvesivaraajia.

Sähkön tuotannon tulee kattaa sähkön kysyntä joka hetki. Jos tuotanto on jonain hetkenä suurempi kuin kysyntä, verkon taajuus alkaa kasvaa. Jos taas kysyntä on tuotantoa suurempi, verkon taajuus alkaa laskea. Verkon toiminnan kannalta taajuuden täytyy pysyä suunnilleen vakiona ja tästä poikkeaminen aiheuttaa häiriöitä. Pitkään sähkövoimajärjestelmissä tuotantoa on säädetty kulutuksen muuttuessa. [19]

Taulukossa 3.1 on esitetty kysyntäjouaston kehitys vuosien varrella. Vuodesta 2012 Elspot-markkinoiden kysyntäjouaston maksimi on kasvanut 400 MW:sta 600 MW:iin. Sen sijaan Elbas-markkinoilla ja säätösähkömarkkinoilla ei ole ollut kehitystä, vaan tarjottavan kysyntäjouaston määrä on pysynyt ensin mainitulla 0-200 MW ja jälkimmäisellä 100–300 MW välillä. Vuosien 2017 ja 2018 välillä taajuusohjatuissa reserveissa on ollut merkittävää kasvua. Taajuusohjattu häiriöreservi on kasvanut 200 MW ja käyttöreservi 8-kertaiseksi 0,5 MW:sta 4 MW:iin. Automaattisen taajuudenhallintareserville tarjotun kysyntäjouaston koko on pysynyt 0 MW:ssa. Tehoreservi on kasvanut 10 MW:sta 22 MW:iin.

Luvussa 2 kerrottiin sääriippuvaisen ja tuotannoltaan vaihtelevan tuulivoiman ja aurinkosähkön lisääntyvän edelleen tulevaisuudessa, minkä takia säätövoiman tarve kasvaa entisestään. Uusiutuvan energian asettamiin haasteisiin voidaan vastata myös kysyntäjouaston avulla.

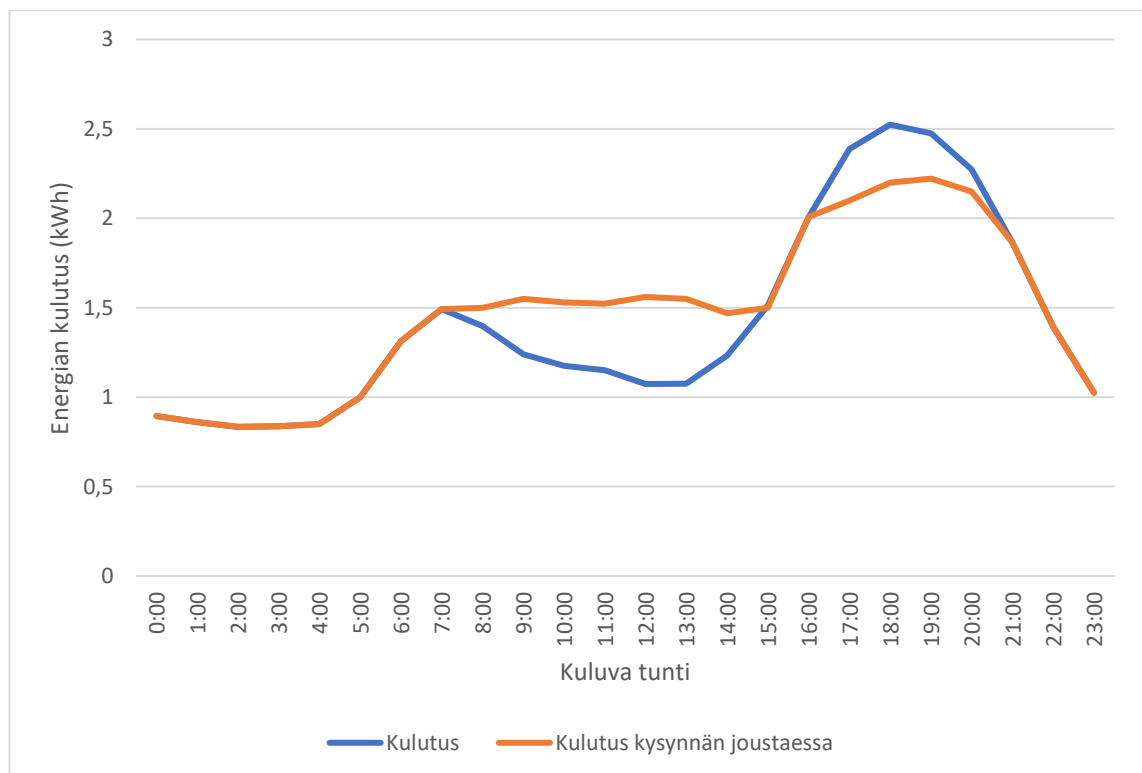
Taulukko 3.1 Kysyntäjouaston kehitys eri markkinapaikoilla [20, 21, 22]

	2012	2017	2018
Elspot	200-400 MW	200-600 MW	200-600 MW
Elbas	-	0-200 MW	0-200 MW
mFRR	100-300 MW	100-300 MW	100-300 MW
FCR-D	40 MW	230 MW	430 MW
FCR-N	-	0,5 MW	4 MW
aFRR	-	0 MW	0 MW
Tehoreservi	-	10 MW	22 MW

Kysynnänjousto voidaan tyypillisesti jakaa kolmeen osa-alueeseen, jotka ovat huipun leikkaus, kuopan täyttö ja kuorman siirto. Huipun leikkaus tarkoittaa, että kulutusta vähennetään sellaisilta hetkiltä, jolloin kuormitus on suuri. Kuopan täytöllä tarkoitetaan kulutuksen lisäämistä niinä ajanhetkinä, jolloin kuormitus on pientä. Kuorman siirto yhdistelee kahta edellä mainittua tapaa eli huippuhetken kuormitusta jaetaan alhaisemman kuormituksen ajoille. [23]

Kuvassa 3.1 on esitetty esimerkki näistä kysynnän jouston osa-alueista. Kuvan sininen käyrä kuvaa kuormitusta tilanteessa, johon ei vaikuta kysynnän jousto. Nähdään, että illalla on erityisen suuri ja aamupäivällä matala kuormitus. Oranssi käyrä taas kuvaa, miten kysynnän jousto voisi vaikuttaa kuormitukseen. Siinä illasta on leikattu kuorman huippu ja siirretty se aamupäivälle täyttämään kuoppaa. Käytännössä tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi lämminvesivaraajalla, josta riittää lämpöä illan ajaksi.

Kysynnän joustoon liittyy kiinteästi kuormanohjaus. Kuormanohjaus voidaan jakaa suoraan ja epäsuoraan ohjaukseen. Suorassa kuormanohjauksessa kuorma voidaan suoraan kytkeä pois päältä. Tätä voidaan tehdä esimerkiksi lämminvesivaraajille, joissa vesi pysyy lämpimänä, vaikka sitä ei lämmitetä joka hetki. Epäsuoraa kuormanohjausta voi kuvailla taloudelliseksi vaikuttamiseksi. Siinä kannustetaan kuluttajaa vähentämään kulutustaan huipputehohetkinä erilaisin hinnoittelutavoin. [23]



Kuva 3.1 Talouden esimerkissäähkönkulutus tunneittain tammikuussa

3.1 Markkinaperusteinen kysyntäjousto

Kysyntäjousto toteutuu useimmiten markkinaehtoisesti. Teollisuuslaitokset vähentävät kulutustaan tunneilta, jolloin sähköhinta on korkea, koska ostamatta jääneen sähkön säästö on suurempi kuin tuotannon hidastumisesta aiheutunut menetys. [12] Huomioitavaa on, että kysyntäjoustoa voidaan käyttää vain siirtämään toiseen ajankohtaan tai poistamaan kulutusta, jonka on suunniteltu tapahtuvan. [24]

Markkinaehtoisien kysyntäjoustopotentialien kuuluu täyttää osallistumansa markkinapaikan ehdot. Näihin kuuluu esimerkiksi, kuinka paljon tehoa pitäisi pystyä tarjoamaan, kuinka pitkän ajan ja kuinka nopeasti. Nämä rajoittavat osin potentiaalisia kysyntäjoustokohteita liittymästä markkinapaikoille. Pienkulutuksella ja –tuotannolla on kuitenkin mahdollisuus osallistua kysyntäjoustoon aggregaattoreiden kautta. Aggregaattorit ovat yrityksiä, jotka keräävät pienemmistä toimijoista suuremman kokonaisuuden. [25]

3.2 Teollisuuden kysyntäjoustopotentiaali

Säätövoiman tavoin myös kysyntäjoustoa tarvitaan lisää sähköntuotannon kasvaessa sääriippuvaisella aurinko- ja tuulivoimalla ja tasaisella teholla tuottavalla ydinvoimalla. Suurten teollisuusyritysten tarjoama kysyntäjousto ei riitä, joten Fingrid on Pöyryn kanssa kartoittanut käyttämätöntä kysyntäjoustopotentiaalia vuonna 2014 [25].

Kartoituksessa on selvinnyt, että Suomessa on edelleen paljon hyödyntämätöntä kysyntäjoustopotentiaalia erityisesti metsä-, metallinjalostus- ja kemianteollisuuden alojen eri sivuprosesseissa. Nämä alat ovat olleet jo aktiivisesti mukana kysyntäjoustopotentialien hyödyntämisessä. Lisäksi kartoituksessa on löytynyt sopivia uusia kohteita esimerkiksi kaivannais- ja elintarviketeollisuudessa, kiinteistöyhtiöissä, vedenkäsittelyprosesseissa ja kasvihuoneissa. [25]

3.3 Pienasiakkaan kysyntäjousto

Suomessa on pitkät perinteet pienkuluttajien jonkinasteisesta kysynnän joustosta käyttäen epäsuoraa kuormanohjausta. Suomessa on ollut jo pitkään käytössä päivä- ja yösähkön käytön erilainen hinnoittelu, jolla pyritään tasaamaan kulutusta päivän ja yön välillä. Käytännössä kuluttajilla on ollut esimerkiksi porrastetusti aikaohjattuja lämminvesivaraajia, jotka kytketään päälle tiettyyn kellonaikaan yöllä. Ajatuksena on, että öisin sähkönkulutus on pienempää ja siksi sähkön hinta on yleensä myös pienempi. Sopimusta hyvin hyödyntävä asiakas pyrkii vähentämään sähkönkulutustaan päivällä ja siirtämään sitä yöaikaan.

Tämä ei kuitenkaan ole ongelmatonta, sillä käytännössä aikaohjatut kuormat aiheuttavat sen, että tiettyihin kellonaikoihin kytketään isoja määriä kuormia, minkä takia kyseisille ajanhetkille voi tulla suuria kulutuspiikkejä [24]. Joissain releohjauksissa on otettu käyttöön ohjauksen satunnaisuus eli yöaikaohjaus menee vasta satunnaisen ajan päästä päälle [26]. Lisäksi sähkömarkkinoiden vapautumisen myötä päivä- ja yösähkön hintaero on pienentynyt. Spot-hintojen huiput ovat satunnaisempia, jolloin aikaan perustuva ohjaus

ei vastaa todellisia markkinahintoja eikä siten todellista ohjaustarvetta. Siksi pienasiakkaat voivat hyötyä todelliseen sähkönhintaan perustuvasta suorasta kuormanohjauksesta. [24]

Energiateollisuus on suositellut ohjaukseen liittyviä ehtoja. Käyttäjä ja sähkönmyyjä voivat itse sopia sähkönsaantiin liittyvistä rajoitteista, jos käyttäjällä ei ole suoraa sähkölämmitystä. Suoraa sähkölämmitystä saa rajoittaa vuorokaudessa korkeintaan 5 tuntia yhteensä. Kerralla ohjaus saa kestää 1,5 tuntia ja sitä seuraavana tuntina ei saa sähkönsaantia ei saa rajoittaa vähintään niin pitkään aikaan kuin mitä ohjausta on kestänyt. [27]

Myös suoraa kuormanohjausta käyttämällä pienkuluttajan kysyntäjoustoa on kannattavinta toteuttaa ohjaamalla sähkölämmitystä. Yksittäisen pienkuluttajan tarjoama kysyntäjousto ei tosin ole lainkaan vakio, vaan siihen vaikuttaa esimerkiksi ulkolämpötila ja ajankohta. Parhaimmillaankin yhden pienkuluttajan tarjoama jousto on niin pieni, ettei sitä voi suoraan tarjota markkinapaikoilla, joille on määritelty pienin mahdollinen tarjottava teho. Ratkaisuna tähän on aggregaattori, joka voi muodostaa useasta pienkuluttajasta kysyntäjoustoa tarjoavan kokonaisuuden. [24]

3.4 Aggregaattorit

Yksittäisen pienkuluttajan tarjoama kysyntäjoustop määrä eri ajanhetkillä on pieni, minkä takia pienkuluttajien osallistuminen suoraan markkinapaikoille ei ole mahdollista. Useiden pienkuluttajien tai -tuottajien kysyntäjoustop yhdistäviä toimijoita kutsutaan aggregaattoreiksi. Aggregaattori yhdistää pienkuluttajien joustop yhdeksi isommaksi kokonaisuudeksi, jota se voi tarjota eri markkinapaikoilla. [28]

Aggregaattorina voi toimia sekä asiakkaan sähkönmyyjä tai itsenäinen toimija, jolla tarkoitetaan toimijaa, joka ei ole asiakkaan sähkönmyyjä tai tasevastaava. Itsenäinen toimija ei tarvitse sopimusta sähkönmyyjän tai tasevastaavan kanssa vaan ohjaa asiakkaan kulutusta tai tuotantoa ja tarjoaa joustoa sähkömarkkinoille. Tästä voi aiheutua ongelmia, sillä itsenäisen aggregaattorin aiheuttamat muutokset kulutuksessa tai tuotannossa voivat vaikeuttaa esimerkiksi yksittäisten tuntien hintaan tai aiheuttaa ongelmia verkon tasapainossa. Tämän takia on tärkeää, että itsenäisten aggregaattorien oikeudet, vastuut ja velvollisuudet tulee määritellä. [28]

Tällä hetkellä asiakkaan sähkönmyyjät voivat toimia jo aggregaattoreina. Sähkönmyyjät huolehtivat asiakkaidensa sähköhankinnasta tukkumarkkinoilta ja taseen tasapainottamisesta. Käytännössä sähkönmyyjät seuraavat asiakkaidensa kulutusta ja pyrkivät huomioimaan asiakkaiden tavan reagoida sähköhinnan muutoksiin. Tällaista hinnan ohjaamana tapahtuvaa kysyntäjoustoa kutsutaan implisiittiseksi kysyntäjoustoksi. [28]

Eksplisiittisellä kysyntäjoustolla tarkoitetaan kysyntäjoustoa, joka perustuu ulkoiseen pyyntöön. Käytännössä asiakkaiden sähköhankintaa ohjataan ulkoisesti ja ohjauksesta saatava jousto tarjotaan sähkömarkkinoille koostetusti. Eksplisiittisessä kysyntäjoustossa

ongelmaksi muodostuu, että markkinapaikasta riippuen aggressiivisella ulkoisella ohjauksella voidaan vaikuttaa muiden toimijoiden taseisiin, jolloin kysyntäjousto voi nostaa muiden toimijoiden kustannuksia ja täten vähentää kysyntäjousta saatavaa hyötyä. [28]

Aggregaattorin tekemien ohjausten tulee olla mitattavissa ja todennettavissa. Jos aggregaattori ei pysty täyttämään tarjottua joustoja, pitää aggregaattorin vastata toimittamattomasta tarjouksesta markkinapaikan sääntöjen mukaisesti. [28]

4. KYSYNTÄJOUSTON MARKKINAPAIKAT

Sähkön kysynnän ja tarjonnan tasapainottamisen kannalta sähkön hinnalla on merkittävä vaikutus, sillä sähköä ei voida juurikaan varastoida ja sähkönpuutteesta voi tulla suuria kustannuksia. Hyvin toimivalla ja kilpailulla sähkömarkkinalla taataan mahdollisimman halvalla tuotettu sähkö. [29]

Sähkömarkkinat sisältävät useita eri markkinapaikkoja, joilla on eri ehtoja esim. kysyntäjoustoon liittyen minimisäädön ja aktivoimisajan suhteen. Kuvassa 4.1 on taulukoitu eri markkinapaikat ja esitelty niihin liittyviä ehtoja.

Tuote	Sopimustyyppi	Minimi-tarjouskoko	Aktivoituminen	Aktivoituu
Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N)	Vuosi- ja tuntimarkkinat	0,1 MW	Lineaarisesti välillä 50,1 - 49,9 Hz, 0,1 Hz muutos 100 % 3 min	Useita kertoja tunnissa
Taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D)	Vuosi- ja tuntimarkkinat	1 MW	Voimalaitokset: lineaarisesti välillä 49,9 - 49,5 Hz kun f alle 49,5 Hz 50% 5s ja 100% 30s	Useita kertoja vuorokaudessa
			Relekytketyt kuormat: vaihtoehtoisesti 49,7 Hz 5s TAI 49,6 Hz 3s TAI 49,5 Hz 1s	Muutaman kerran vuodessa
Automaattinen taajuudenhallintareservi (aFRR)	Tuntimarkkinat	5 MW	FG:n lähettämän tehopyyntisignaalin mukaisesti, 100% 2 min	Useita kertoja vuorokaudessa
Säätösähkömarkkinat (mFRR)	Tuntimarkkinat	5 MW	100% 15 min	Tarjouksen ja säätötarpeen mukaisesti
Säätökapasiteettimarkkinat (mFRR)	Viikkomarkkinat	5 MW	100 % 15 min	Tarjouksen ja säätötarpeen mukaisesti
Vuorokausimarkkina (Elspot) **)	Tuntimarkkinat	0,1 MW	12 h	-
Päivän sisäinen markkina (Elbas) **)	Tuntimarkkinat	0,1 MW	1 h	-
Tehoreservi ***)	Pitkäaikainen	10 MW	15 min kuormille, 12 h voimalaitoksille	Harvoin

Kuva 4.1 Kysyntäjouston markkinapaikat ehtoineen [30]

4.1 Nord Pool Spot

Nord Pool Spot on sähkön tukkumarkkinan kauppapaikka, jossa kauppaa käydään niin muiden Pohjoismaiden kuin Baltian maiden kanssa. Siellä käydään kauppaa sähköpörssin fyysisillä tuotteilla kahdella eri markkinapaikalla, Elspot- ja Elbas-markkinoilla.

4.1.1 Elspot-markkinat

Sähköpörssin perusta on Nord Poolissa käytävä Elspot-markkina, jossa käydään tunti-kohtaisesti kauppaa seuraavalle päivälle. Kauppoihin osallistuu noin 360 myyjää ja ostajaa, joiden pitää ennalta suunnitella kaupankäyntiään. Ostajien pitää arvioida, kuinka paljon energiaa tarvitaan, jotta kysyntään pystytään vastaamaan. Lisäksi ostajan pitää päättää, kuinka paljon on valmis maksamaan energiasta. Myyjä sen sijaan arvioi myytävissä olevan energian ja antaa tälle hinnan. [31]

Elspot perustuu suljettuun kaupankäyntikierrokseen tarkoittaen, että markkinaosapuolet eivät tiedä toistensa tarjouksista. Kukin toimija ilmoittaa vuorokauden jokaiselle tunnille oman tarjouksensa, joka sisältää vähintään ostettavan tai myytävän energiamäärän ja hintavälin tälle. Tarjouksen energiamäärän pitää olla vähintään 0,1 MWh. Tunneille, joille ei haluta tehdä tarjousta, merkitään energiamääräksi nolla. Lisäksi voidaan antaa blokkitarjouksia. Ne ovat tarjouksia, jolloin tarjoudutaan myymään tai ostamaan tietyn määrän energiaa monena tuntina peräkkäin ja joissa ostetaan tai myydään tietty energiamäärä vähintään kolmena peräkkäisenä tuntina. Blokkitarjoukset toteutuvat vain, jos hinta- ja energiamääräehdot täyttyvät täysin. Tarjoukset pitää jättää käyttötunteja edeltävänä päivänä kello 13 mennessä. [18]

Flexitarjous on blokkitarjouksista tehty muunnelma, jossa ostaja tai myyjä tarjoaa tehoa joustavalla aikavälillä. Esimerkiksi voidaan tarjota 1 MW tehon joustoa neljäksi tunniksi aikavälillä klo 12-20. Tarjoaja ei siis päättää, milloin jousto tarkalleen tapahtuu, vaan ajan-kohta päätetään algoritmin avulla sen perusteella, milloin siitä hyödytään eniten. [32]

Tehoreservikapasiteetista muodostetaan Elspot-markkinoille kullekin tunnille määrään perustuva tehoreservitarjous. Se huomioidaan, jos kysyntään ja tarjontaan ei muodostu tasapainoa Elspot-markkinoilla [33]

Tarjouksien annon määrääjän umpeuduttua osto- ja myyntitarjoukset kootaan yhteen kunkin tarjousalueen perusteella ja syötetään tietokonejärjestelmään, joka laskee hinnan. Yksinkertaistetusti tarjouksien perusteella seuraavan päivän jokaisesta tunnista tehdään omat kysyntä- ja tarjontakäyrät hinta-energia-akselilla. Näiden leikkauspisteestä muodostuu systeemihinta, joka on sama kaikille markkinaosapuolille koko pohjoismaisella markkina-alueella. [31]

Tarjousalueita on Nord Poolin kauppaa-alueella viisitoista. Näistä neljä on Ruotsissa, viisi Norjassa, kaksi Tanskassa ja yksi Suomessa, Virossa, Latviassa sekä Liettuassa. Tarjousalueiden rajojen määrittelyn tekevät alueen kantaverkkoyhtiö. Tarjousalueet auttavat huomioimaan sähkönsiirron aiheuttamat rajoitukset ja varmistavat paikallisten markkina-tilanteiden vaikutuksen hintaan. Tarjousalueet näkyvät aikaisemmin esitetyssä kuvassa 2.3. [34]

Sähkönsiirron pullonkaulojen takia eri tarjousalueille voi syntyä eri aluehinnat. Tällaisten alueiden välillä sähköä siirretään halvemmalla alueelta kalliimpaan suuremman kysynnän perusteella. [34]

4.1.2 Elbas-markkinat

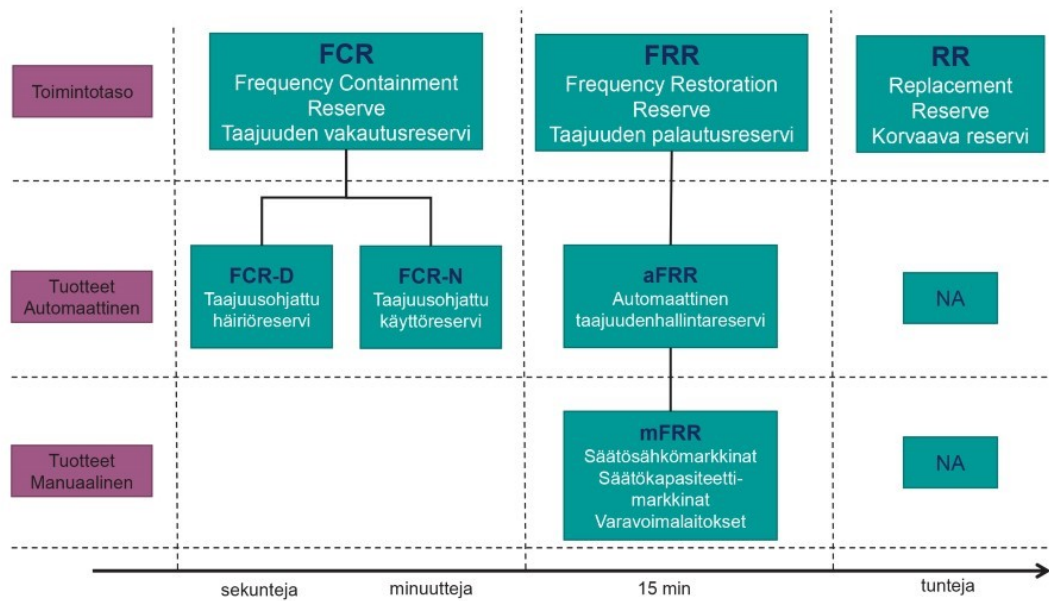
Suurin osa kauppojen volyymista tapahtuu Elspot-markkinoilla, ja suuremmalti osin tasapaino tarjonnan ja kysynnän välillä taataan täällä. [35] Elspot-markkinoilla tehdyt kaupat perustuvat kuitenkin ennusteisiin seuraavan päivän tuotannosta ja kulutuksesta. Ennustettu kulutus voi erota paljonkin toteutuneesta kulutuksesta, jos esimerkiksi lämpötila on odotettua kylmempi tai lämpimämpi. Tuotanto taas voi erota ennustetusta, jos esimerkiksi tuuliennusteet muuttuvat vaikuttaen tuulivoimatuotantoon. Siksi tarvitaan Elbas-markkinoita Elspotin jälkimarkkinapaikaksi tasapainottamaan kulutusta ja tuotantoa. Nord Poolin tarjoama Elbas-markkina-alue kattaa Pohjoismaat, Baltian, Iso-Britannian ja Saksan markkinat. Sähkön tuotannon lisäksi Elbas-markkinoille voidaan tarjota myös kysyntäjoustoa. [35]

Päivän Elbas-markkinat avautuvat toteutuvaa päivää edeltävänä päivänä noin klo 15 Elspot-kauppojen tulosten julkistamisen ja reklamaatioajan jälkeen [18]. Elbas-kauppojen teko on mahdollista tuosta hetkestä aina tuntiin ennen kauppooja koskevaa tuntia. Kaupat käsitellään saapumis- ja paremmuusjärjestyksessä, jolloin korkein ostotarjous ja matalin myyntitarjous tulevat ensiksi. [35]

Tuulivoiman lisärakentaminen on kasvattanut Elbas-markkinoiden merkitystä. Kuten edellä mainittiin muuttuvien tuuliolosuhteiden vaikutuksesta tuulivoimatuotantoon, tuulivoimatuotantoennusteen Elspot-hetkellä ja toteutuneen tuulivoimatuotannon erotuksesta pitää huolehtia Elbas-markkinoiden kautta. Täten Elbas-markkinat ovat avainasemassa sääolosuhteista riippuvaisten uusiutuvien sähkötuotantomuotojen yleistymisessä. [35]

4.2 Fingridin reservituotteet

Sähköjärjestelmän toiminnan kannalta on tärkeää pitää taajuus normaalialueella, joka on 49,9 - 50,1 Hz. Tasapainotilannetta voidaan hakea aikaisemmin esitetyillä Elspot- ja Elbas-markkinoilla, mutta käyttötunnin aikana tasapaino saadaan Fingridin reservituotteilla. Ne voidaan jakaa aktivointiajan perusteella eri kategorioihin. Reservituotteet ja niiden aktivointiaika on esitetty kuvassa 4.2.[36]



Kuva 4.2 Fingridin reservituotteet [36]

Taajuuden vakautusreservi (FCR, Frequency Containment Reserve) huolehtii sekunneissa taajuuden muutoksista sähköjärjestelmässä ja on suunniteltu huolehtimaan jatkuvasta taajuudenhallinnasta. FCR on jaettu taajuusohjattuun käyttöreserviin (FCR-N) sekä taajuusohjattuun häiriöreserviin (FCR-D). Mikäli sattuu taajuushäiriö, joka ei korjaannu pelkästään taajuuden vakautusreservillä, aktivoidaan taajuuden palautusreservi (FRR, Frequency Restoration Reserve). Tämän tarkoitus on nimensä mukaisesti palauttaa taajuus normaalialueelle. Näin vapautetaan vakautusreservi takaisin jatkuvaan taajuudenhallintaan. Palautusreserviin kuuluvat automaattinen taajuudenhallintareservi ja manuaalisesti käytettävät säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat. Mahdollisia häiriötilanteiden jälkeisiä uusia vikatilanteita varten voi valmistautua vapauttamalla palautusreservit korvaavalla reservillä (RR, Replacement Reserve). Tätä ei ole käytössä Pohjoismaiden sähköjärjestelmässä. [36]

Fingrid on pyrkinyt tekemään reserviensä vaatimuksistaan sellaiset, ettei reservimarkkinoille osallistuvan suuren yksittäisen kohteen ohjauslogiikka aiheuta ongelmia tai pahenna häiriötä. Esimerkiksi taajuusohjatussa häiriöreservissä on voitu sopia kuorman kokonaan pudottamisesta taajuuden ollessa 49,5 Hz. Tällaisen kuorman suuri määrä voi aiheuttaa ongelmia. Tätä on ratkaistu olemalla hankkimatta tällaisia kohteita vain sen verran kuin on turvallista olla. Tulevaisuudessa ollaan menossa siihen suuntaan, että omaa ohjausta pitää pystyä järjestämään enemmän. Tämä tarkoittaa oman irtikytkennän ryhmittelyä niin, ettei kaikki tapahdu samalla hetkellä. [37]

4.2.1 Säätosähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR)

Fyysisten markkinoiden viimeisellä kaupankäyntipaikalla säätosähkömarkkinoilla käyttötunnin aikainen tuotanto ja kulutus tasapainotetaan. Säätosähkömarkkinoille voi tarjota 5 MW, jos se aktivoidaan elektronisesti, tai 10 MW, jos se aktivoidaan 15 minuutin kuluessa. Osallistujien pitää ilmoittaa tarjouksensa viimeistään 45 minuuttia ennen käyttötunnin alkua. Tehoreservimyyjät jättävät säätökapasiteettitarjouksensa jo edeltävänä päivänä klo 13.00 mennessä ja nämä käytetään säätosähkötarjousten hyödyntämisen jälkeen. Markkinoille voi osallistua niin tuotannon kuin kuorman haltijat. Tarjouksen yhteydessä tehon ja hinnan lisäksi pitää ilmoittaa, onko kyseessä tuotanto- vai kulutuskohde, millä siirtoalueella tarjotaan ja säätöresurssin nimi. [38]

Tarjoukset asetetaan hintajärjestykseen, jolloin syntyy pohjoismainen säätökäyrä ylös- ja alassäädöistä. Ylössäätötarjoukset asetetaan niin, että halvin tarjous on ensin ja alassäätötarjoukset sitä vastoin kallein ensin. [18]

Alassäädöllä tarkoitetaan sitä, että sähköä ostetaan Fingridiltä. Tällöin toimija vähentää tuotantoaan tai lisää kuormaa. Alassäädön hinta on halvimman käytetyn alassäätötarjouksen hinta, mutta enintään tunnin Elspot-hinta. Ylössäädöllä taas tarkoitetaan, että myydään sähköä Fingridille. Käytännössä siis lisätään tuotantoa tai vähennetään kuormaa. Ylössäätöhinta on kalleimman käytetyn ylössäätötarjouksen hinta, mutta vähintään tunnin Elspot-hinta. Tämä on vaikuttanut siihen, että sähkön tuottajille säätosähkömarkkinoille osallistuminen on houkuttelevaa. [12]

Reservimarkkinoille reservinhaltijan ansainta perustuu kahteen korvaustyyppiin, energia- korvaukseen sekä kapasiteettikorvaukseen. Energiakorvauksella tarkoitetaan korvausta, jonka Fingrid maksaa käytetystä säätötehosta. Kapasiteettikorvauksella tarkoitetaan korvausta, jonka Fingrid maksaa kapasiteetin varallaolosta. [39]

Korvaukset määräytyvät säätökapasiteettimarkkinoiden tarjouskilpailun perusteella. Tarjouskilpailu kohdistuu hankintajaksoon, joka on aina yhden CET-aikavyöhykkeen mukainen kalenteriviikko. Tarvittava ylös- tai alassäätökapasiteetti julkaistaan ennen hankintajaksoa, pääsääntöisesti viimeistään 10 päivää ennen jakson alkua. Markkinaosa- puolen tulee jättää tarjouksensa kilpailussa määräaikaan mennessä, joka on yleensä viimeistään 6 päivää ennen hankintajakson alkua. Kuvassa 4.3 on esitetty aikataulu tarjouskilpailun kulusta. [39]



Kuva 4.3 Tarjouskilpailun aikataulu [39]

Kuvassa Fingrid julkaisee tarjouskilpailun sekä arvion hankintamäärästä 10 päivää (D-10) ennen hankintajakson ensimmäistä päivää. 6 päivää ennen hankintajakson alkua kapasiteettitarjoukset tulee olla jätetty. 4 päivää ennen hankintajakson alkua Fingrid ilmoittaa tarjouskilpailun tuloksista. Päivää ennen hankintajakson alkua (klo 13:00) säätö-kapasiteettitarjoukset tulee olla jätetty. [39]

Kapasiteettikorvaus määräytyy tarjouskilpailussa tarjouksen mukaisesti kapasiteettikorvauksen tarkistusmenettely huomioon ottaen. Hankintajakson jälkeen Fingrid tarkistaa säätökapasiteettitarjouksen toteutuneen pysyvyyden hankintajakson aikana sekä huomioi mahdolliset maksetut energiakorvaukset. Tarkistettu kapasiteettikorvaus lasketaan alla olevalla kaavalla. [39]

$Kapasiteettikorvaus_{tarkistettu}$

$$= Kapasiteettikorvaus * pysyvyysskerroin - Energiakorvaukset$$

Pysyvyys määräytyy edellisenä päivänä klo 13:00 (EET) mennessä jätettyjen tarjousten perusteella seuraavan kaavan mukaisesti.

$$pysyvyys_{tunti} = \frac{\text{klo 13:00 mennessä jätetty tarjous (MW)}}{\text{Hyväksytty tarjous (MW)}}$$

Pysyvyys määräytyy tunneittain ja on korkeintaan 100 % jokaisella tunnilla. Jos tarjousta ei ole jätetty edellisen vuorokauden klo 13:00 mennessä, tarjous on poistettu tai sitä on pienennetty klo 13:00 jälkeen tai reservinhaltijan ollessa kykenemätön toimittamaan tilausta, pysyvyys on kyseisen tunnin kohdalla 0 %. Hankintajakson pysyvyys on hankintajakson tuntikohtainen keskiarvo. Kapasiteettikorvauksen laskennassa käytetty pysyvyysskerroin määräytyy pysyvyyden perusteella seuraavan taulukon 4.1 mukaisesti:

Taulukko 4.1 Kapasiteettikorvauksen pysyvyysskerroin [39]

Pysyvyys	100 %	95 %	90 %	85 %	80 %	75 %	70 %	65 %	60 %	55 %	50 %
Pysyvyysskerroin	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0

Käytännössä pysyvyyskerroin putoaa nopeasti pysyvyyden heikentyessä, minkä takia kapasiteettikorvaus pienenee nopeasti nolnaan. [39]

Jos kohde aktivoidaan, energiakorvaus vähennetään edellä mainitusta korvauksesta. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että energiakorvauksen kasvaessa kokonaiskorvaus pysyy vakiona, kunnes energiakorvaus ylittää kapasiteettikorvauksen. Tämän jälkeen reservinhaltija saa energiakorvauksen suuruisen korvauksen.

Säätösähkömarkkinoilla on ollut jo pidempää kysyntäjoustoa, mutta lähinnä suurteollisuudesta [37] Fingridillä on tällä hetkellä käynnissä säätösähkömarkkinoille suunnattu pilotti, jossa Fingrid kehittää yhdessä yhteistyökumppaneidensa kanssa aggregointimallia säätösähkömarkkinoille. Pilotin tavoitteena on selvittää aggregoinnin mahdollistamista useasta taseesta sekä toimitusketjun ulkopuolisen myyjän osallistumista säätösähkömarkkinoille. Pilotin lopputulokset ovat saatavilla todennäköisesti vuoden 2019 alussa. [40]

4.2.2 Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N) ja taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D)

Elbas- ja säätösähkömarkkinatkaan eivät saa aina sähkötasetta tasapainoon, koska siinä kauppaa käydään tunnin tarkkuudella. Sähköverkon taajuuden pitäminen n. 50 Hz:ssä vaatii tuotannon ja kulutuksen pitämisen tasapainossa joka sekunti. Tällöin käytössä on taajuudentuenta. Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi ovat ns. pyörivää reserviä, jotka aktivoituvat automaattisesti taajuuden muuttuessa. Taajuusohjatulla häiriöreservillä voimajärjestelmän pitää selvittää suuren voimalaitoksen irtoamisesta verkosta niin, että taajuuspoikkeama on korkeintaan 0,5 Hz. Käyttöreservin suuruus joka hetki on 600 MW. [12]

Kuvassa 4.1 on esitetty taajuusohjattujen käyttö- ja häiriöreserveihin ehtoja, jotka osallistujien pitää pystyä toteuttamaan. Taajuusohjatun käyttöreservin tulisi aktivoitua kolmessa minuutissa taajuuden poiketessa vähintään 0,1 Hz 50 hertsin taajuudesta. Joustoa pitää tarjota vähintään 0,1 MW. Taajuusohjatun häiriöreservin pitää aktivoitua 5 sekunnissa, jos taajuus on 49,7 Hz, 3 sekunnissa, jos taajuus on 49,6 Hz, tai 1 sekunnissa, jos taajuus on 49,5 Hz. Tähän voi osallistua minimissään 1 MW:n teholla. [30]

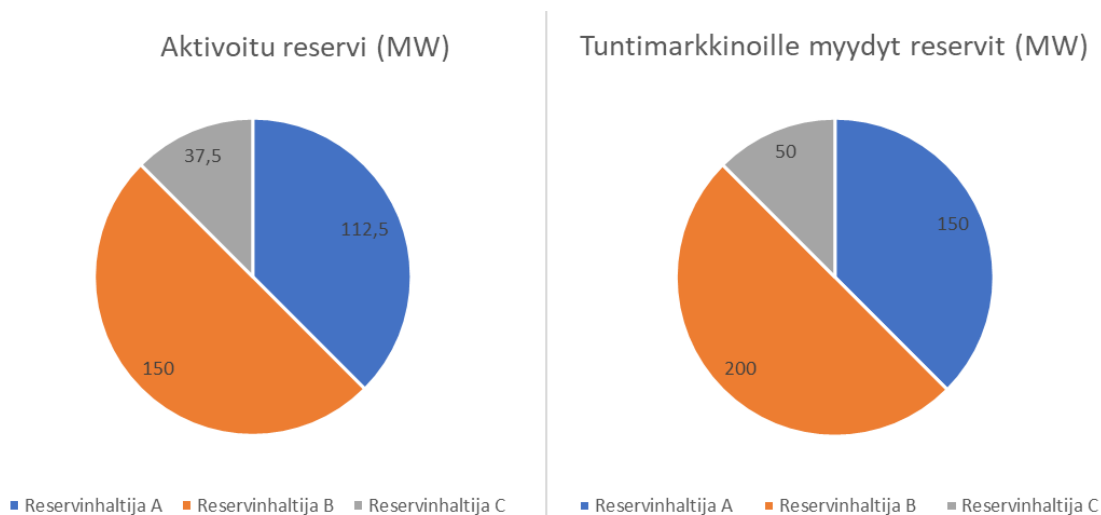
Muutaman viime vuoden aikana kysyntäjoustop määrää FCR-D-markkinalla on kasvanut räjähdysmäisesti. Sen sijaan FCR-N-markkinoilla kysyntäjoustoa ei juurikaan ole, joten se taitaa olla haastava markkinapaikka. [37]

4.2.3 Automaattinen taajuudenhallintareservi (aFRR)

Vuonna 2013 käyttöön otettu uusi reservilaji, automaattinen taajuudenhallintareservi (aFRR) on automaattisesti taajuuden muutoksiin reagoiva reservi. Reservin tavoitteena on palauttaa verkon taajuus 50 Hz:n nimellistaajuuteen. Reservin aktivointi perustuu pohjoismaisen synkronialueen taajuuspoikkeamaan. Automaattiseen taajuudenhallintareserviin osallistuvan pitää pystyä tarjoamaan vähintään 5 MW:n säädön kahdessa minuutissa, jos tarjous on tilattavissa elektronisesti. Muutoin minimisäätö on 10 MW. Yksittäinen säätötarjous voi olla korkeintaan 50 MW. [41] Käytännössä reservin pitää reagoida viimeistään 30 sekunnin kuluttua signaalin vastaanottamisesta. Reserviin osallistuva tekee Fingridin kanssa sopimuksen, jolla reservi varataan Fingridin käyttöön määritellyille tuntimarkkinoille [42].

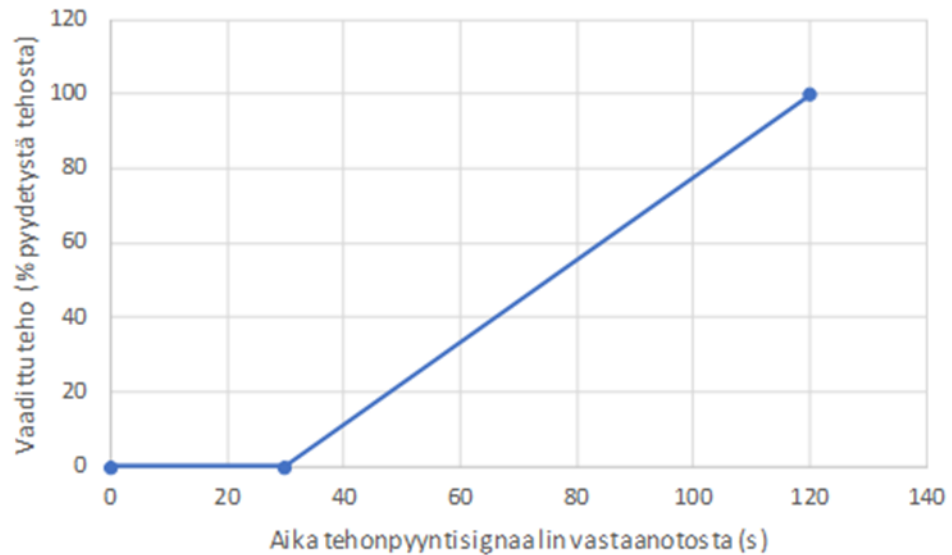
Reservi on keskitetty järjestelmä, jota operoi Norjan kantaverkkoyhtiö Statnett. Statnettin käytönvalvontajärjestelmä laskee, kuinka paljon tehoa tarvitaan taajuuden palauttamiseksi 50 Hz:iin, ja lähettää tiedon kantaverkkoyhtiöille. Fingrid lähettää toimijoille aktivointisignaalia 10 sekunnin välein. Riippuen signaalin etumerkistä reserviä käytetään joko ylös- tai alassäätöön. [41]

Aktivoitu reservi määräytyy suhteutettuna tuntimarkkinoilla tehtyihin kauppoihin. Esimerkiksi jos kolme reservinhaltijaa ovat tarjonneet reserviin kuvan 4.4 mukaisesti 400 MW ja tarvittava reservi on 300 MW, aktivoidaan jokaisen reservinhaltijan reservistä 300 MW / 400 MW = 75 %. [41]



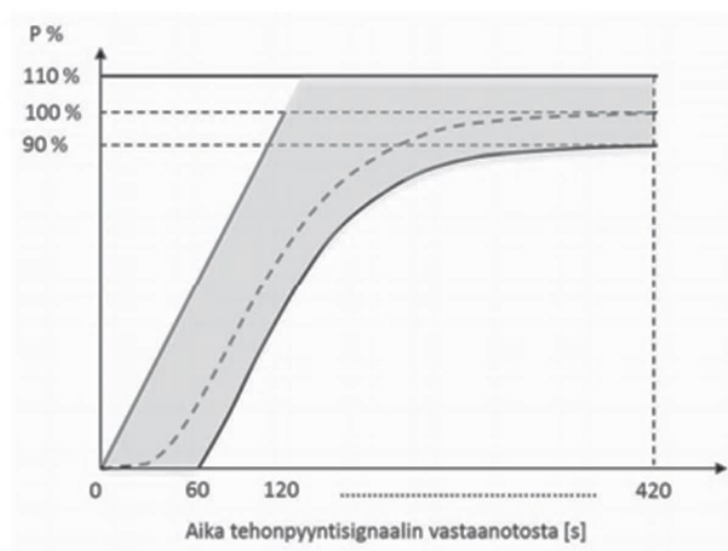
Kuva 4.4 Esimerkki aFRR:n aktivoidusta ja tuntimarkkinoille myydystä reservistä

Aktivointi tapahtuu käyttäen kahta erityyppistä aktivointisignaalia riippuen reservin aktivointinopeudesta. Nopeaan säätöön kykenevällä vesivoimalla aktivointisignaali on suodatettu. Näin huolehditaan siitä, että taajuudenhallintareservi ei toimi päällekkäin muiden taajuusohjattujen reservien kanssa. Hitaammin säätävälle tuotannolle suodatusta tehdään vähemmän. Nopeammin säätävälle tuotannolle (esimerkiksi vesivoima), kokonaisaktivoitumisaika saa olla korkeintaan 120 sekuntia ja säädön on alettava viimeistään 30 sekuntia signaalin vastaanottamisesta. Kuvassa 4.5 on esitetty vaadittu aktivoitu teho ajan funktiona aktivointisignaalin vastaanottamisen jälkeen. [41]



Kuva 4.5 Automaattisen taajuudenhallintareservin aktivointi

Hitaammin säätävälle tuotannolle (esim. lämpövoimatuotannolle) sovelletaan askelmaista aktivoitumismallia, jossa aktivoituneen tuotannon pitää olla kuvassa 4.6 esitetyllä harmaalla alueella. [41]



Kuva 4.6 Hitaammin säätävän taajuudenhallintareservin aktivointi [41]

Reserveihin osallistuakseen reservinhaltijan tulee täyttää säätökyvyn asettamat vaatimukset. Käytännössä tämä todennetaan tekemällä säätökokeita, jotka suoritetaan ennen kuin reservinhaltija voi osallistua markkinoille. Mikäli reservinhaltijan järjestelmiin tehdään muutoksia, jotka vaikuttavat säätökykyyn, on testit tehtävä uudestaan. [41]

Järjestelmä vaatii reaaliaikaista tiedonvaihtoa reservinhaltijan ja Fingridin välillä. Fingrid vaatii seuraavat tiedot korkeintaan 10 sekunnin lähetysrytmillä:

- Reservin ylläpitoon myyty ylössäätökapasiteetti
- Reservin ylläpitoon myyty alassäätökapasiteetti
- Reservin aktivoinnista aiheutuva reaaliaikainen teho
- Fingridin lähettämän aktivointisignaalin lähetys takaisin [41]

Toistaiseksi aFRR-markkinalla ei ole kysyntäjoustoa, mutta Fingridillä on tarkoitus lisätä aFRR-hankintaansa. Näin ehkä myös kysyntäjouston määrä kasvaa tällä markkinalla. [37]

4.2.4 Tehoreservi

Luvussa 2 käsiteltiin tehoreserviä ja erityisesti sen voimallaitoksiin liittyvää käytäntöä. Talvesta 2013–2014 alkaen tehoreserviin on voinut liittyä myös rajoittamalla sähkönkulutusta eli kysyntäjoustolla [13]. Nämä ovat Fingridin ja eri teollisuusyritysten kanssa sovittuja irti kytkettäviä kuormia, joiden avulla Fingrid voi tarvittaessa huolehtia tehotaapainosta nopeasti [25].

Tehoreservin kysyntäjouston valmiusaika saa olla käytösäännön mukaan enintään 12 tuntia talvikautena aikavälillä 1.12.-28.2.. Tuona aikana tehoreservikuorman pitää olla valmius vähintään 200 tunnin aktivointiin. Kohteen pitäisi pystyä vähintään 10 megawatin joustoon 15 minuutissa käskyn antamisesta ja kestää kahden tunnin yhtämittainen aktivointi. Jouston jälkeen kuorma pitäisi pystyä aktivoimaan uudelleen enintään kuuden tunnin lepoajan jälkeen. Tehoreservivoimallaitosten tavoin myös tehoreservikuorman tekninen toimivuus varmistetaan koekäytöllä. Tehoreservikuormat valitaan Energiemarkkinaviraston järjestämän tarjouskilpailun kautta. Valitusta kuormasta on velvoitettu jättämään tarjous säätösähkömarkkinoille talvijaksolla vähintään 12 tuntia ennen käyttötuntia, jotta se voidaan aktivoida käyttötuntina säätösähkömarkkinoilla. Tarjouksen hinta on se hinta, jonka kuormanhaltija on ilmoittanut Energiemarkkinavirastolle tarjouskilpailun aikana. [43].

Tehoreservin kysyntäjoustolla on tiukemmat ehdot koskien esimerkiksi valmiusaikaa kuin markkinaperusteisella kysyntäjoustolla. Tehoreservin kysyntäjousto ei voi osallistua normaaliin joustoon, vaan sitä käytetään vasta kaikkien markkinaehtoisten säätötarjousten käytettyä. Kymmenen minuutin aikavaatimus voi olla rajoittava tekijä aggregoiduille sähkölämmityskuormille erityisesti kommunikaation vaatiman ajan takia. Aggregaattorin ja verkkoyhtiön välisen viestinnän lisäksi aikaa kuluu myös itse kommunikaatioyhteydessä ja kuormien ohjauksessa, joissa on viivettä. Aggregoidissa

pienkuluttajia pitää olla melko suuri määrä, jotta voidaan täyttää 10 megawatin jouston vaatimus. Lisähaastetta tuo myös, jos jouston pituus on monen tunnin pituinen. [25]

4.3 Reservien ansaintamallit

Seuraavissa esimerkeissä on hyödynnetty ansaintaesimerkkejä, jotka Fingrid on laskenut eri reserveihin liittyen. [44]

4.3.1 Taajuusohjattu käyttöreservi

Jos kohdetta pystytään säätämään sekä alas että ylös useita kertoja tunnissa, kohde voi osallistua taajuusohjattuun käyttöreserviin. Kohteen osallistuessa vuoden 2018 hinnoilla ja 7000 tunnin pysyvyydellä vuosimarkkinoille, kohde saa alla olevan korvauksen reservin ylläpidosta:

$$0,1 \text{ MW} * 14,0 \frac{\text{€}}{\text{MW}, h} * 7000 \text{ h} = 9800 \text{ €/vuosi}$$

Kohteen osallistuessa tuntimarkkinoille vuoden 2017 toteutuneilla hinnoilla 4000 tunnin pysyvyydellä, kohde saa alla olevan korvauksen reservin ylläpidosta. [44]

$$0,1 \text{ MW} * 27,4 \frac{\text{€}}{\text{MW}, h} * 4000 \text{ h} = 10\,960 \text{ €/vuosi}$$

4.3.2 Taajuusohjattu häiriöreservi

Jos kohdetta pystytään säätämään taajuuden laskiessa alle 49,9 Hz, kohde voi osallistua taajuusohjattuun häiriöreserviin. Taajuusohjatussa häiriöreservissä kohteen säätöaktiivointeja tapahtuu harvemmin kuin käyttöreservin tapauksessa. Kohteen osallistuessa vuosimarkkinoille 3000 tunnin pysyvyydellä käyttäen vuoden 2018 hintoja kohde saa alla olevan korvauksen reservin ylläpidosta.

$$1 \text{ MW} * \frac{2,7 \text{ €}}{\text{MW}, h} * 3000 \text{ h} = 8100 \text{ €/vuosi}$$

Kohteen osallistuessa tuntimarkkinoille 900 tunnin pysyvyydellä käyttäen vuoden 2017 tuntimarkkinatoteumia kohde saa alla olevan korvauksen reservin ylläpidosta. [44]

$$1 \text{ MW} * 17,3 \frac{\text{€}}{\text{MW}, h} * 900 \text{ h} = 15\,570 \frac{\text{€}}{\text{vuosi}}$$

4.3.3 Säätosähkömarkkinat

Jos kohdetta pystytään säätämään noin 15 minuutin kuluessa, voi kohde osallistua säätosähkömarkkinoille. Säätosähkömarkkinoilla jätetään tunneittain ylös- ja alassäätötarjouksia. Säätoimarkkinoiden korvaus määräytyy kalleimman hyväksytyn tarjouksen mukaisesti. Yli 100 €/MWh ylös- ja alassäätöjen keskimääräinen hinta on ollut 176

€/MWh vuonna 2017. Tällaisia tunteja on ollut 2 % vuoden tunneista. Tällä perusteella 5 MW ylössäätötarjous 100 €/MWh hintaan tuottaisi

$$5 \text{ MW} * 176 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} * 8760 \text{ h} * 0,02 = 154\,176 \text{ €/vuosi}$$

Säätösähkömarkkinoilla toimiva kohde voi osallistua myös säätökapasiteettimarkkinoille, joissa reservinhaltija saa korvauksen siitä, että tarjoukset jätetään jo edellispäivänä. Kapasiteettikorvaukseen vaikuttaa myös kapasiteetin pysyvyys. Jos 5 MW kapasiteettitarjous on hyväksytty hintaan 500 €/MW/viikko saa reservinhaltija siitä tällöin [44]

$$5 \text{ MW} * 500 \text{ €/MW/viikko} = 2500 \text{ €/viikko}$$

4.4 Markkinapaikkojen kehitysnäkymiä

Työtä tehdessä oltiin myös Fingridiin yhteydessä sen suhteen, miten siellä suhtaudutaan kysyntäjoustopuon kehittukseen. [37]

Fingridillä on huomattu kiinnostuksen kysyntäjoustopuon kohtaan kasvaneen viime aikoina, sillä yhteydenotot eri toimijoilta ovat lisääntyneet asiaan liittyen. Lisäksi joillain reservimarkkinoilla on ollut räjähdysmäistä kasvua. Fingrid ei kuitenkaan ole itse ottanut tavoitteeksi erityisesti lisätä kysyntäjoustopuon tai tehnyt ennustetta johonkin vuoteen mennessä tehtävää kysyntäjoustopuon lisäästä, vaikka oman oppimisensa kannalta on toteuttanut pilotteja, joilla on kannustanut kulutuskohdeita osallistumaan kysyntäjoustopuon. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, ettei Fingrid huomioisi kysyntäjoustopuon tai muun joustopuon kapasiteetin mahdollista kasvua. Markkinapaikkojen eri vaatimuksia laatiessaan Fingrid miettii, mihin pitäisi pystyä varautumaan ja miten varmistetaan sähköverkon toiminta, ettei esimerkiksi sähköautojen, pientuotannon, kysyntäjoustopuon tai muun sellaisen yleistymisen aiheuta ongelmia. [37]

Kohteiden aggregoinnin takia Fingridin on täytynyt miettiä, miten sovelletaan taajuusohjatuille reserveille liittyville kuormille vaadittuja säätökokeita. Reserviin kuuluvien voimalaitosten ja kuormien toiminta ja säätökyky pitää olla yksinkertaisesti tarkistettavissa. Jos reserviin kuuluu esimerkiksi 10 000 kotitaloutta, tarkistamisessa pitää käyttää sopivia soveltamiskeinoja, että varmistutaan kohteiden säätökyvystä ja ylipäättänsä olemassaolosta. Lisäksi reservintarjoajien määrän kasvaminen työllistää Fingridiä, koska kommunikoinnissa ja teknisessä tuessa vaaditaan lisäresurssia. [37]

Fingrid on tehnyt taustatöitä esimerkiksi kommunikointivälineiden kehittämisessä tehokkaan toiminnan takaamiseksi. On kuitenkin hyvä tiedostaa, että kulutuskohdeita ohjataan eri tavoin kuin sähköntuotantolaitoksia. Usein kulutuskohdeiden ohjaus perustuu tietoliikenteeseen, esimerkiksi viestintään matkapuhelinverkoissa. Täten pitäisi miettiä toimintaa tilanteessa, jossa kaikki matkapuhelinverkot tai yhden operaattorin verkot ovat pimeänä. [37]

Kuten aikaisemmin mainittiin, Fingrid on toteuttanut aikaisemmin pilotteja kannustaakseen kulutuskohteita kysyntäjoukseen. Kysyntäjoustopiloteista Fingrid oppi, että kulutuskohteesta kannattaa miettiä tarkkaan, mille markkinapaikalle se soveltuisi eikä vain yrittää ilmoittautua markkinapaikalle, josta saisi parhaimmat tuotot. Toinen opittu asia liittyy mittaukseen. Esimerkiksi otetaan suuri kohde, jossa on useampi ylös tai alas säätyvä kuorma, mutta itse reservimarkkinoille osallistuu vain pari kuormaa. Tällöin ei riitä, että mitataan koko kohteen kulutusta, koska silloin ei pystytä mittaamaan itse säätöä muiden kuormien vaihtelusta aiheutuvasta kohinasta, vaan pitää olla kohdennetumpi mitaus. Kolmantena asiana piloteista huomattiin, että keskusteltiin ihmisten kanssa, joille reservimarkkinat eivät ole entuudestaan tuttuja tai jotka eivät olleet sähköalalta. Tällöin kysyntäjoukon tarjoajilla on haasteena ymmärtää oikein Fingridin asettamat ehdot. Fingrid kehottaa olemaan aktiivisesti yhteydessä heihin alusta alkaen, jottei kuormia ohjelmoida tai parametroida väärin. [37]

Suoranaisesti kysyntäjoukseen ei ole tulossa uusia pilotteja, mutta säätösähkömarkkinoilla on käynnissä aggregointiin liittyvä projekti, josta tuloksia on odotettavissa alkuvuonna 2019. Mahdollisesti aggregointipilottiin tulee vielä jotain jatkohankkeita. Lisäksi Fingridillä on meneillään Suvilahden akkujärjestelmään liittyvä hanke, jossa tutkitaan energiavarastojen toimivuutta reservinä. Fingridin näkökulmasta akkujen hyviä puolia on niiden nopeus ja se, että niiltä tulee juuri sellainen vaste kuin halutaan. Niiden haasteina nähdään tarjotun energiamäärän pienuus, suuret investointikustannukset ja mahdolliset uuden tekniikan lastentaudit. [37]

Tulevista akustoista huolimatta Fingrid suhtautuu neutraalisti joukkoa tarjoaviin kohteisiin suosimatta jotain yli muiden. Kotitalouksissakin Fingrid näkee hyviä kysyntäjoukkoja lämmityksen lisäksi esimerkiksi sähköautojen latauksessa. Pienkulutuksen kysyntäjoukon haasteena se näkee, että löytyykö tahoa, joka tekisi aggregoinnin kustannustehokkaasti ja osaisi myydä sen hyvin kuluttajille. [37]

Markkinoiden ehtoihin on odotettavissa muutoksia. Taajuusohjattujen reservien markkinoilla tehdään fuusioteknisiä muutoksia, joilla taataan järjestelmän käyttövarmuus. Käytännössä reserveissa pitää reagoimaan säätötarpeeseen nopeammin, mutta täyteen tehoon tarvitsee päästä yhtä nopeasti kuin nykyäänkin. Lisäksi tasejakso on lyhenemässä yhdestä tunnista 15 minuuttiin. [37]

Automaattisella häiriöreserville ja säätösähkömarkkinoille on tulossa myös muutoksia, jotka perustuvat Euroopan unionin lainsäädännön ohjaama Euroopan sähkökaupan harmonisointi. Tähän kuuluu tuotteiden standardointi eli markkinasääntöjen yhdenmukaistaminen. Näistä on käynnissä aFRR-markkinoita koskeva PICASSO-projekti ja mFRR-markkinoita koskeva MARI-projekti, jotka aiheuttavat merkittäviä tietojärjestelmämuutoksia. Projektien tarkoituksena on, että vuoteen 2022 mennessä säätösähkömarkkinoilla säädön aktivoitumisaika on 12,5 minuuttia ja aktivoinnin minimikesto on 5 minuuttia. Automaattisella häiriöreservillä 18.12.2025 alkaen aktivoitumisaika kasvaa 5 minuuttiin ja aktivoinnin minimikestolla ei ole aikarajaa. Sekä mFRR-

ja aFRR-markkinoilla minimitarjouskoko laskee tehoon 1 MW. Tarjoukset jätetään 25 minuuttia ennen käyttötuntia. [37]

Muutoin Fingrid ei ole suunnittelemassa minimitarjouskokojen pienentämistä, sillä ne ovat jo aika pienet. Fingrid on pitänyt isohkoja ja fiksusti aggregoituja kokonaisuuksia toimivina myös käytännön syistä, koska näin tarvitsee tehdä esimerkiksi vähemmän tietojärjestelmämuutoksia ja reaaliaikatietoja. Myöskään mittausvaatimukseen ei ole tulossa kevennyksiä, koska nämä Fingrid kokee olevan tasapainossa sen suhteen, mitä tarvitaan ja mitä on kohtuullista vaatia. Mittausten suhteen Fingrid haluaa painottaa väärinkäsitysten takia, ettei vaadi jokaiselle kulutuskohteelle reaaliaikamittausta, vaan haluaa tietää ohjattavissa olevan kokonaiskuormituksen tilanteen. Käytännössä voi esimerkiksi mitata 10 % kohteista ja mallintaa näin koko paketin tilanne. Mallin toimivuus pitää tosin pystyä perustelemaan Fingridille. Tällaista mallia ei ole toistaiseksi kukaan vielä tarjonnut, vaan kohteisiin on asennettu tarvittava mittaus. Oletettavasti tämä ei ole siis ollut kohtuuton kustannus reservinmyyjälle, joka saanee samalla itselleen tai asiakkaalleen kiinnostavia tietoja, joilla on itsessään arvoa. [37]

5. KYSYNTÄJOUSTON LAITTEISTOT

Kysyntäjoustop ohjauslaitteena voidaan käyttää etäluettavaa energiamittaria (AMR), kodin energiahallintajärjestelmää (HEMS) tai kiinteistöautomaatiojärjestelmiä (BACS). Tässä työssä keskitytään kahteen ensimmäiseen. AMR-laitteilla tehtävässä ohjauksessa tehdään yhteistyötä jakeluverkkoyhtiöiden kanssa, koska kyseessä on näiden asentamat laitteet. HEMS-laitteilla voidaan toteuttaa kysyntäjoustop ohjaus ilman verkkoyhtiöiden osallistumista. Vaikka sähkönmyyjillä onkin tärkeä rooli kysyntäjoustop tuotteiden kehityksessä, kysyntäjoustop vaatii vielä paljon yhteistyötä eri toimijoiden välillä. Esimerkiksi eri tuotteissa ei ole standardoituja rajapintoja tai toimintamalleja. Lisäksi pitää selvittää tasevastuuseen liittyvät kysymykset.

Tässä luvussa esitellään ensimmäiseksi AMR- ja HEMS-laitteet. Sen jälkeen kerrotaan eri toimijoista, joiden tuotteita voidaan hyödyntää kysyntäjoustopissa.

5.1 Automaattinen mittarinluenta (AMR)

Etäluettavat sähkömittarit (AMR-mittari, automatic meter reading) mahdollistavat niimensä mukaisesti sähköön kulutustietojen luennan lähes reaaliajassa. Tämä mahdollistaa kulutuksen seurannan huomattavasti perinteistä paikallisesti luettavaa mittaria tehokkaammin sekä kuluttajan että sähköön myyjän ja verkkoyhtiön näkökulmasta. Etäluettavat mittarit mahdollistavat laskutuksen toteutuneen kulutuksen perusteella eikä arvioon perustuen, jolloin sähkölasku selkeytyy kuluttajalle. [45]

AMR-mittarit kykenevät mittaamaan eri suureita. A+ tarkoittaa, että mittari kykenee mittaamaan pätötehon kulutusta, A- , että mittari kykenee mittaamaan pätötehon tuotantoa. R+ tarkoittaa, että mittari kykenee mittaamaan loistehon kulutusta ja R-, että mittari kykenee mittaamaan loistehon tuotantoa. [46] 4-kvadranttimitari kykenee mittaamaan kaikkia näistä [47].

Etäluettavat sähkömittarit tuli ottaa Suomessa lakisääteisesti käyttöön vuoden 2013 loppuun mennessä tavoitteena, että vähintään 80 % jakeluverkon asiakkailta on etäluettava sähkömittari [47]. Suuremmille sulakekoille etäluettavien mittareiden käyttöönotto on alkanut jo edellisen vuosikymmenen vaihteen jälkeen. Etäluettavien mittareiden osuus PJ-verkon käyttöpaikoista oli 99,6 % vuoden 2016 lopulla. [48]

Etäluettavien mittareiden laajamittainen käyttöönotto on mahdollistanut uudenlaisia sähkösopimuksia kuluttajien ja sähkönmyyjien välillä. Aiemmin pienkuluttajien sähkösopimuksissa energiahinnat olivat kiinteähintaisia tai aikariippuvaisia (esim. päivä- ja yösähkö). Etäluettavat mittarit mahdollistavat esimerkiksi Spot-hintaan sidotut sähkösopimukset. [48] Potentiaalista AMR-mittareilla ohjattavaa kuormaa on arvioitu verkkoyhtiökyselyjen ja laskelmien perusteella olevan yli 1000 MW, kunhan tiedonsiirto

saadaan standardoitua sähkönmyyjien ja verkkoyhtiöiden välillä [5]. Fingridin reservimarkkinoille ja nopeaan ohjaukseen nykyinen AMR-teknologia on vielä puutteellinen [5].

Sähkön hintaan sidottujen sähkösopimusten lisäksi osa etäluettavista mittareista mahdollistaa myös automaattisen ohjauksen, jonka avulla pienkuluttajien kysyntäjouaston automatisointi onnistuu ilman erillistä kodin automaatiolaitteistoa. Nykyiset etäluettavat mittarit ovat kuitenkin vielä varsin toisistaan poikkeavia, eivätkä täytä kaikkia tulevaisuuden tarpeita. [48]

Etäluettavien mittareiden käyttöiäksi on määriteltä 10–20 vuotta, joten ensimmäisiä seuraavan sukupolven mittareita aletaan asentaa 2020-vuosikymmenen alkupuolella. Viimeistään vuoden 2030 paikkeilla korvataan viimeisetkin ARM-mittarit seuraavan sukupolven mittareilla. [28]

Pöyryn vuonna 2017 tekemässä selvityksessä käsiteltiin tulevaisuuden etäluettavien mittareilta vaadittavia ominaisuuksia. Selvityksessä haastateltiin useita sidosryhmien edustajia ja tuloksena oli lista vaatimuksista, joita mittareiden tulisi täyttää.

Pöyryn selvityksen mukaan vaadittuja perustoiminnallisuuksia ovat:

- Tasejakson mukainen mittaustiheys
- Etäkatkaisumahdollisuus
- Etäpäivitysmahdollisuus
- Avoin standardoitu fyysinen liityntärajapinta
- Pätö- ja loistehon tuotannon ja kulutukset mittaus kaikissa vaiheissa
- Näyttö mittauslaitteessa
- Sähkön laatuun liittyvät hälytykset
- Tietosuoja ja -turva

Mittaukset tulisi tehdä vaiheittain, sillä tämä mahdollistaisi verkonhaltijoille mittaustiedon monipuolisemman käytön ja lisäksi sähköturvallisuutta. Tasejakson lyheneminen 15 minuuttiin tulisi huomioida tulevaisuuden laitteissa. Lisäksi laitteissa tulisi olla tuki myös jopa lyhyemmälle tasejaksolle. [48]

Selvityksessä erityisesti verkkoyhtiöt listasivat etäkytkentämahdollisuuden ominaisuudeksi, joka pitäisi olla kaikissa etäluettavissa mittareissa. Etäkatkaisu mahdollistaa kulutuspisteen irtikytkennän verkosta etänä. Mittareiden etäpäivitettävyyden tulisi olla mahdollista. Etäpäivitettävyyden mahdollistaisi mittarissa olevien laiteriippumattomien ominaisuuksien käyttöönoton jälkikäteen. [48]

Avoin standardoitu fyysinen liityntärajapinta mahdollista etäluettavan mittarin kytkemisen osaksi älykasta kotiautomaatiojärjestelmää. [48]

Etäluettavan mittarin näyttöä pidettiin turhana, sillä asiakkaiden ei koettu olevan kiinnostuneita kulutustietojen tarkkailuun mittarin näytöstä. Lisäksi näyttöön pääsy ei ole aina

mahdollista. Näyttö kuitenkin pitää EU:n mittalaitedirektiivin mukaisesti olla, eikä vaatimusta voi kansallisesti ohittaa. [48]

Aktiiviset hälytykset koettiin tärkeinä etenkin verkkoyhtiöiden toimesta, sillä niiden koettiin parantavan verkonhallintaa ja sähköturvallisuutta sekä tehostavan ylläpito- ja viankorjaustoimintaa. [48]

Työ- ja elinkeinoministeriö (TEM) on perustanut älyverkkotyöryhmän pohtimaan älykkään sähköjärjestelmän toteuttamisen ehtoja. Työryhmän tehtävän asettelun oleellisena osana kuuluu myös kysyntäjousto sekä tulevaisuuden AMR-mittareiden ominaisuudet. Lopullisen mietintönsä työryhmä antaa lokakuussa 2018.[28]

TEM:n älyverkkotyöryhmän yhden alatyöryhmän tehtävä oli analysoida älyverkkotyöryhmän linjausta siitä, että etäluettavissa energiamittareissa tulee olla kuormanohjausrele, jota palveluntarjoajat voivat käyttää avoimen rajapinnan kautta. AMR-mittareita voidaan ohjata kolmella eri tavalla [49]:

- a) Ennalta määritelty kalenteriohjaus, jossa AMR-mittarille lähetetään etukäteen aikaan sidottu ohjaussekvenssi.
- b) Suora ohjaus, jossa AMR-mittarille lähetetään ohjauskäsky suoraan tarvittaessa
- c) Kalenteriperusteinen paikalliseen mittaukseen perustuva ohjaus, jossa mittaukseen perustuva ohjaus toteutetaan, jos toiminnallisuus on aktiivinen, kalenterin mukaisesti.

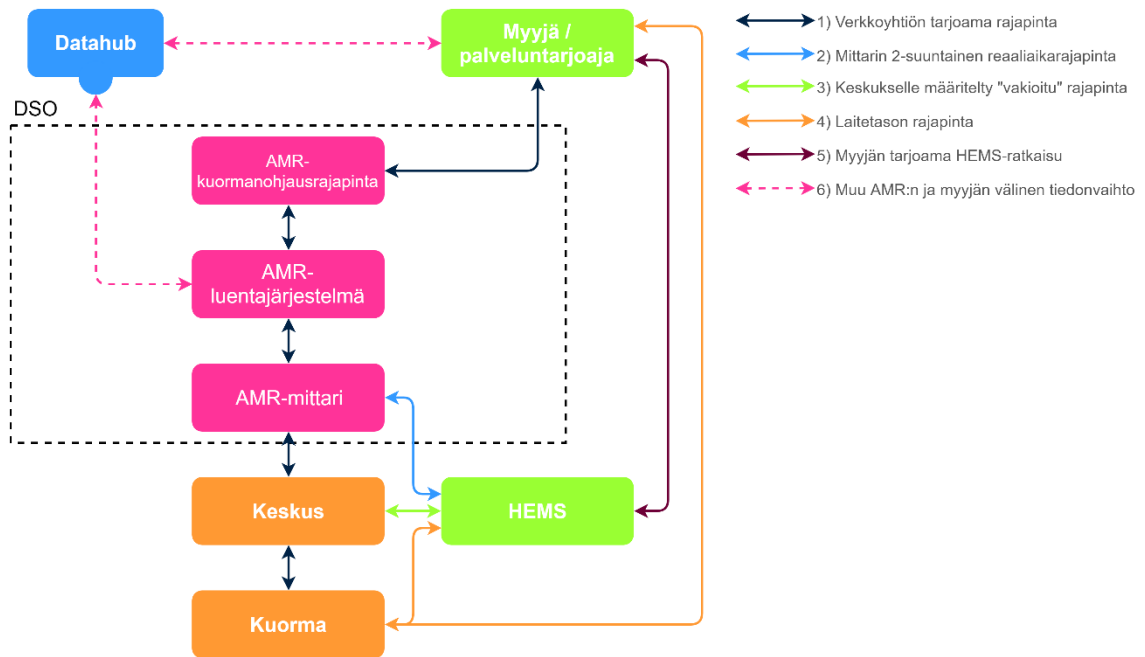
Markkinapaikat asettavat tiettyjä vaatimuksia sille, kuinka nopeasti ohjausparametrit tulee voida välittää AMR-mittareille. Elspot-markkinoilla seuraavan päivän hinta julkaistaan klo 15, jolloin aikaa jää huomattavasti (9 tuntia) seuraavan päivän ohjauskalenterien välittämiseen. Tämä on riittävän aikaisin, että jo nykyisetkin järjestelmät kykenevät välittämään tiedot AMR-mittareille ajoissa. [49]

Elbas-markkinoiden kaupankäynti sulkeutuu 30 minuuttia ennen toimitusjakson alkua, joten ohjausviestit tulee tällöin kyetä toimittaa 30 minuutin kuluessa. Tasejakson lyhentyessä myös ohjausviestien aikaikkuna lyhenee, esimerkiksi 15 minuutin tasejaksolla ohjausikkuna olisi tällöin vastaavasti enää 7,5 minuuttia. [49]

Reservimarkkinoilla ohjauksen tulee tapahtua lyhyessä ajassa ja ohjaus pitää olla todennettavissa, minkä takia reservimarkkinat asettavat selkeästi suurimmat vaatimukset ohjausrajapinnalle. [49]

Vähittäismarkkinoilla, Elspot- ja Elbas-markkinoilla voidaan hyödyntää pääasiassa kalenteriohjausta (a) ja suoralla ohjauksella (b) voidaan tehdä korjausliikkeitä, joilla parannetaan markkinoille osallistumista. Tasehallinnassa voidaan hyödyntää suoraa ohjausta. Reservimarkkinoilla voidaan hyödyntää suoraa ohjausta tai kalenteriin ja paikalliseen mittaukseen perustuvaa ohjausta (c). [49]

Työryhmä listasi myös erilaisia tapoja AMR-mittareiden ohjaukseen. Kuvassa 5.1 on esitetty erilaisia ohjausmahdollisuuksia. [49]



Kuva 5.1. Vaihtoehtoisia kuormanohjaustapoja [49]

Älyverkkotyöryhmä listasi kuormanohjausrajapinnalle yleisiä toiminnallisia vaatimuksia, kuten:

- Kuormanohjausrajapinnan pitää olla yhtenäinen vähintäänkin kansallisesti ja mieluusti markkina-aluekohtaisesti.
- Kuluttajan pitäisi pystyä osallistumaan päivän sisäiseen markkinaan, mikä tarkoittaa, että ohjaus olisi käytettävissä useita kertoja päivässä.
- Ohjauksen pitää olla mahdollista vähintään käyttöpaikan tasolla.
- Tieto ohjattavissa olevasta kuormasta on saatavilla järjestelmässä, josta toimijat voivat tiedon tarvittaessa hakea.
- Ohjausparametrit pitää pystyä välittämään laitteille markkinapaikkojen vaatimissa ajoissa.
- Ohjauksen todennettavuus.

Nykyisillä mittareilla on mahdollista päivittää kalenteripohjaisen ohjauksen parametreja. Käytännössä tehdyillä toimenpiteillä on havaittu, että kalenteriohjauksen parametrit pystytään välittämään 90 %:iin kohteista (10 000 kohdetta) 10 minuutin kuluessa ja päivän sisäisten markkinoiden vaatimassa 30 minuutissa tieto pystytään välittämään 95%:iin kohteista. Suora ohjaus on nykyisillä mittareilla mahdollista ja tapahtuu suurimmassa osassa tilanteista 30 sekunnin kuluessa, mutta isomman mittarijoukon yhtäaikaista ohjausta ei ole toteutettu. Lisäksi jotkin nykyiset mittarit asettavat rajoitteita suorille ohjauskomennoille. [49]

5.2 Kodin energiahallintajärjestelmä (HEMS)

Kiinteistöohjaus- ja kotiautomaatiojärjestelmät ovat yleistyneet viime vuosina asuinrakennuksissa. Esimerkiksi Porin asuntomessualueilla (2018) jo kolmannes taloista sisälsi yksittäisen toimijan kotiautomaatiojärjestelmän. [50, 51] Kokonaisuusosuus on edelleen pieni, mutta kasvaa jatkuvasti. Kotiautomaatiojärjestelmien lisäksi markkinoille on tullut useita kodin energianhallintajärjestelmiä, jotka huolehtivat osittain samoista toiminnoista keskittyen energian kulutuksen säätelyyn. Kodin energianhallintajärjestelmillä pystytään laitteistosta riippuen ohjaamaan ilmanvaihtoa, lämmitystä, muita sähkökuormia, sähköautojen latausta ja myös mahdollista pientuotantoa. [19, 52]

Nykyisillä AMR-mittareilla pystytään toteuttamaan kuorman ohjausta, mutta kotiautomaatiojärjestelmät ja kodin energianhallintajärjestelmät mahdollistavat älykkään ohjauksen sekä kulutukselle että tuotannolle. AMR-mittareilla ohjaus perustuu ulkoa tulevaan käskyyn (esimerkiksi ohjauskäskyyn tai aikapohjaiseen ohjaukseen), eikä ohjauksessa pystytä hyödyntämään mittauksia huoneistosta tai käyttäjän mieltymyksiä. Kotiautomaatio- ja kodin energianhallintajärjestelmät pystyvät päättämään ohjauskäskyn laajasta joukosta ohjausparametreja (asunnon lämpötila, säätötila, sähkön hinta, kuluttajan toive jne.), jolloin lopputulos on todennäköisesti kuluttajan näkökulmasta miellyttävämpi (ja voi myös tuottaa enemmän taloudellisia säästöjä). [19]

Suomessa tarjolla olevat kodin energianhallintajärjestelmät ovat pääasiassa sähkölämmityksen ohjaukseen keskittyneitä järjestelmiä, jotka asennetaan järjestelmän toimittajan valtuuttaman urakoitsijan toimesta. Järjestelmät koostuvat yleensä keskusyksiköstä, joka ohjaa yksikköön kytkettyjä lämmityslaitteita sekä vastaanottaa järjestelmän pilvipalvelusta ohjausparametreja. Keskusyksikön lisäksi järjestelmissä tulee mukana releet, joiden avulla ohjataan eri laitteiden toimintaa sekä antureita, jotka antavat lisätietoa ohjauksen vaikutuksesta asumismukavuuteen. [53, 54]

Vaikka kodin energianhallintajärjestelmiä sekä kotiautomaatiojärjestelmiä on jo nykyisin tarjolla, aiheuttavat standardoimattomat toiminnot sekä rajapinnat haasteita laitteiden laajamittaisessa hyödyntämisessä esimerkiksi kolmansien osapuolien toimesta. Lisäksi toimittajat eivät välttämättä halua, että muut osapuolet käyttävät laitetta hyväkseen. Tämän takia erilaisten sovellusten toteuttaminen laitteiden päälle on hankalaa muiden toimijoiden toimesta.

Pääosa ohjauspotentiaalista tulee lämmityksestä, mutta kodin energianhallintajärjestelmät pystyisivät vaikuttamaan myös kulutukseen tarjoamalla tietoa myös muiden laitteiden kulutuksesta. Muiden laitteiden ohjaus voi aiheuttaa huomattavaa häiriötä, joten ohjaus ei välttämättä ole kannattavaa. Samaan aikaan on kuitenkin mahdollista, että kuluttajat pyrkivät vähentämään kulutusta, kun tieto kulutuksesta lisääntyy. Chen et al. [55] havaitsivat, että reaaliaikainen tieto kulutuksesta vaikuttaa huomattavasti sähkön kulutukseen kotitalouksissa aamusta ja illasta. Vaikka energianhallintajärjestelmän tarjoaman soveluksen seuranta yleensä vähenee jo viikossa hankinnasta, esimerkiksi valaistuksen sähkönkulutuksessa havaittiin jopa 20 % pudotus käytön vähenemisen vuoksi.

5.3 Alan toimijoita

Kysyntäjoustoon liittyen Suomessa toimii jo monia yrityksiä. Seuraavaksi on haastateltu muutamaa näistä. Haastateltavaksi valittiin niin eri sähkömittarivalmistajia kuin lämmönohjausjärjestelmien tarjoajia.

Haastatteluiden pohjana käytettiin luvussa 5.1 listattuja asioita AMR-laitteelta vaadituista perustoiminnallisuuksista. Kysymyksissä käsiteltiin läheisesti kysyntäjoustoon liittyviä teknisiä ominaisuuksia, kuten ohjausnopeudesta ja mittaustiheydestä, mutta myös tietoturvaa ja laitteen antamia hälytyksiä. Haastatteluja käytiin kasvokkain, puhelimitse ja sähköpostitse.

5.3.1 Landis+Gyr Oy

Landis+Gyr on vuonna 1896 perustettu alkujaan sveitsiläinen energia-alan yritys, joka tarjoaa sähkömittareiden välityksellä energiatiedon ja ohjauksen hallintaa. Landis+Gyrin tuotteet sopivat niin kotitalous- kuin yritysasiakkaille. [56]

Landis+Gyrin kulutusmittareille on valittavissa mittausjaksoksi 5, 10, 15, 30 tai 60 minuuttia. Täten tasejakson muuttumiseen yhdestä tunnista varttiin on voitu jo varautua. Mittaustiedon eteenpäinlähetykseen riippuu valitusta kommunikaatiosta. Osaa mittareista luetaan järjestelmästä päin, jolloin mittaustietoa siirretään kerran vuorokaudessa. Uusimmissa kommunikaatioratkaisuissa mittarit voivat lähettää mittaustietoa eteenpäin muutaman sekunnin välein. Mittaus- ja lähetystiheyttä voidaan säätää LTE-, NB-IoT ja G3-plc-kommunikaatioita käytettäessä. Tietoja säilytetään kaikissa mittareissa vähintään 30 vuorokautta mittaussuosituksen mukaisesti, mutta osassa mittareista säilytetään jopa kaksi vuotta. [56]

Mitattavia suureita on paljon ja niihin kuuluu muun muassa pätö- ja loistehon mittaus molempiin suuntiin sisältäen pienasiakkaan tuotannon, jännitteet, virrat ja taajuus. Kysyntäjoustoon hyvin sopivan joustavan lämpökuorman erillinen mittaus ei ole mahdollista. Laite kykenee antamaan yleisesti Suomessa käytössä oleviin jännitteisiin liittyviä hälytyksiä. Niihin saadaan varmaan myös uutena ominaisuutena tehovahtiseurannan. Jännitehälytyksistä ja tietoliikenneongelmista laite ilmoittaa asiakkaalle merkkiledillä. [56]

Lähes kaikki suoraliityntäiset mittarit on varustettu katko-kytkylaitteella ja lisäksi osalla on 8 A, 5 A tai 100 mA rele. Osaa mittareista voidaan käyttää tehovahtina, joka ohjelmoidusta kuorman ylityksestä ohjaa relettä. Taajuuden mukaan tehtävää ohjausta ei ole mahdollista tehdä. Ohjauksen nopeus riippuu valitusta kommunikaatiosta. Esimerkiksi LTE-, NB-IoT- ja LAN-kommunikaatioilla vasteaika on maksimissaan sekunteja, kun taas PLC:llä voi kestä muutamasta sekunnista noin minuuttiin. Verkkoyhtiö voi hallinnoida mittarin kautta tapahtuvaa ohjausta, mutta hallinnointioikeus voidaan antaa myös muille osapuolille. Ohjauksen voi tehdä myös kalenterin perusteella eli ohjata esimerkiksi kellonajan ja päivämäärän mukaan. [56]

Laitteessa on näyttö, josta voi lukea kulutuslukemat. Asiakas voi hankkia laitetta varten myös erillisen näyttöpaneelin tai käyttää tietojensa tarkastamiseen älykännykkäsovellusta. Verkkoyhtiöillä on lisäksi käytössä Asiakasportaali, josta voidaan tarkastaa edellisen vuorokauden kulutuslukemat. Landis+Gyr on selvittänyt, että 2-3 % asiakkaista seuraa kulutustaan jonkin aikaa, mutta useimmiten kiinnostus pian loppahtaa. [56]

Kaikki tietoturva-aineistot määritellään tehtaalla mittarikohtaisesti ja tallennetaan laitteen tietoturvamoduuliin. Tuotannossa tietoturvamateriaali kryptataan avaintiedostoon asiakkaalle toimitettavaksi. Käytössä on useita eri kryptausavaimia. Mittarit ovat etäpäivitettäviä. [56]

Landis+Gyrin kotitalousmittareiden hintoja määrittelevät ensisijaisesti markkinahinnat. Landis+Gyr arvioi tulevaisuudessa eri markkinapaikoille kykenevien kotitalousmittareiden hinnan pysyvän 60-100 euron välillä. [56]

Landis+Gyr arvioi sähkönmyyjien hallitsevan tulevaisuudessa yhä enemmän sähkömarkkinoita. Siksi on odotettavissa, että muut pilvipalvelujärjestelmät ovat suuremmassa roolissa kysyntäjousto-ohjauksissa kuin mittausjärjestelmät. Verkkoyhtiöiden luenta- ja ohjausjärjestelmiä hyödyntävät Suomessa vielä keskisuuret ja pienet sähköyhtiöt, mutta nämäkin vähitellen siirtyvät käyttämään SaaS-järjestelmiä (Software as a Service). Landis+Gyr seuraa ajan trendejä ja kehityssuuntia, jotka perustuvat osin Euroopasta esitettyihin määräyksiin. [56]

5.3.2 Kamstrup A/S

Kamstrup on vuonna 1946 Tanskassa perustettu yritys, joka on valmistanut sähkömittareita vuodesta 1998 alkaen. Se toimittaa mittausjärjestelmiä vesi-, sähkö-, lämpö- ja jäähdytysenergiayhtiöiden käyttöön. [26]

Kamstrupin vuodesta 2004 lähtien toimitetuista laitteista suurimmassa osassa mittausjakso on yksi tunti, mutta on mahdollista käyttää myös 15 minuutin mittausjaksoa. Mittaustietoa lähetetään kerran vuorokaudessa eteenpäin, mutta uudemmilla laitteilla lähetetään 4 kertaa vuorokaudessa eli 6 tunnin välein. Tulevaisuudessa on mahdollista päästä 5 minuutin lähetystiheyteen hyödyntäen NarrowBand-teknologiaa. Tällöin olisi luontevaa tihentää mittausväliäkin, mutta se todennäköisesti otettaisiin käyttöön suurissa kulutuskohteissa ja pienkuluttajien mittauksessa pysyttäisiin 15 minuutin tai yhden tunnin mittausjaksossa. Taajuusmittaus on mahdollinen uusimmissa laitteissa, mutta sitä ei ole vielä otettu käyttöön Suomessa. [26]

Mittaustietoa voidaan säilyttää 1100 päivää, jos kohteessa on käytössä päätetehomittauksen kattava A+-mittaus. Pätö- ja loistehoa molempiin suuntiin mittaavalla 4-kvadranttimittauksella mittaukset säilyvät 700 päivää. Nykyään tietoliikenneongelmista ei ole erillistä hälytystä, mutta uusiin mittareihin on suunnitteilla hälytysjärjestelmä sähkökatkoksiin liittyen. [26]

Sähkölämmitystä voidaan säätää erillisellä releellä. Mahdollisen joustavissa olevan lämpökuorman määrää ei ole mahdollista mitata vielä, mutta Kamstrup uskoo tulevaisuudessa Datahubin ja NarrowBandin mahdollistavan kaiken tiedon saannin oleellisten toimijoiden ulottuville. [26]

Nykyisellään Kamstrupilla ei ole standardoitua tapaa kommunikoida toisen laitteen, esimerkiksi taloautomaation kanssa, koska laitteessa on vain yksi moduulipaikka, joka on varattu releelle. Osassa mittareista on myös toinen moduulipaikka, johon voisi kytkeä laitteen, joka lähettäisi tietoa taloautomaatiolle. Mittarille päin ei kuitenkaan ole mahdollista lähettää ohjauskäskyä. [26]

Verkkoyhtiö voi parametroida hälytykset laitteisiin. Käytännössä ne kykenevät lähettämään hälytyksiä verkosta, jännitemuutoksista, nollaviasta, yli- ja alijännitteistä sekä puuttuvista vaiheista. Hälytykset lähtevät välittömästi verkkoyhtiölle. [26]

Sähkölaitteiden kautta on mahdollista katkaista sähkönsyöttö etänä yhden minuutin viiveellä ohjauskäskyn antamisesta. Releitä voi myös ohjata kellonajan perusteella. Mittarilla on erillinen kuormanohjaustaulukko, johon voi ilmoittaa yö- tai kausisähkön. Koska usean kuluttajan siirtyminen yö sähköön voi aiheuttaa häiriötä aiheuttavan kulutuspiikin, laitteessa on 60 minuutin satunnaisviive yhtäaikaisen poiskytkennän estämiseksi. Laitteelle on mahdollista lähettää kerran vuorokaudessa kuormanohjaustaulukko, jonka perusteella voidaan lämmittää edullisilla Elspot-tunneilla. Tätä ei kuitenkaan ole kellään asiakkaalla vielä käytössä. [26]

Mittareiden mittaustiheyden päivitys on etänä mahdollista ja uudemmissa laitteissa myös ohjelmistopäivitykset ovat etänä mahdollisia. Etäohjauksen tietoturva on hoidettu 128-bittisellä AES-salauksella (Advanced Encryption Standard). Uusissa mittareissa on jokaisessa oma salausavain, joka pitää olla asentajalla muutoksia tehdessä. Muutoksista jää aina lokitieto, josta voidaan tarkastella, mitä muutoksia on tehty. Luenta tapahtuu vanhoissa mittareissa ottamalla mittareihin yhteyttä niiden vanhemman tekniikan takia. Uudemmissa asennuksissa mittarit ottavat yhteyden verkkoyhtiön palvelimeen ja vievät tiedot verkkoyhtiölle. Tällöin laitteeseen ei tarvitse jättää avonaisia tietoliikenneporteja. [26]

Kamstrupin näkemys on, että kysyntäjousto tapahtuu vielä vuosien ajan pääosin sähkömittarien kautta, sillä on paljon releohjattavia sähkölämmitteisiä taloja. Toisaalta Kamstrupin mielestä on kiinnostavaa seurata kolmannen osapuolen laitevalmistajia, esimerkiksi kodinenergiahallintajärjestelmävalmistajia, jos ne voivat toteuttaa kysyntäjouston kuluttajille edullisemmalla tavalla. [26]

5.3.3 MX Electrix Oy

MX Electrix Oy (jatkossa Electrix) on pälkäneläinen perheyritys joka valmistaa sähkö-energiamittareita. Yritys on erikoistunut sähkönladun mittaamiseen ja sen asiakkaat ovat pääasiallisesti sähköverkkoyhtiöt. Kiinteästi asennettuja mittareita kytetään sähköasemille ja isoille KJ- liittymillä oleville teollisuusasiakkaille. Lisäksi mittareita asennetaan väliaikaisesti esimerkiksi kuluttajan luokse laskutusmittarin yhteyteen tai tilalle todentamaan sähkönladun hyvyys. [57]

Electrixin mittari eQL Laatuvahti2 mittaa vaihe- ja pääjännitteet sekä huomattavan määrän jännitelatuun liittyviä suureita esimerkiksi jännitekuopat ja –kohoumat, kokonaissäröt, epäsymmetriat ja tiettyjä harmonisia yliaaltoja. Virtasuureista mitataan vaihevirratt ja niiden hetkelliset (100ms) tehollisarvot. Tehosuuremittauksiin sisältyy vaiheittaiset ja 3-vaiheiset pätötehot, Fryzen loisteho, 50 Hz loisteho ja näennäisteho. Lisäksi mittari mittaa muun muassa jännitekatkot, taajuuden ja vaiheittaisen tehokertoimen. [57]

Laite kykenee säilyttämään mittaustietoja 10 päivää 10 minuutin mittausjaksolla. Mittari voi ottaa yhteyttä palvelimeen 1, 5 tai 15 minuutin välein. Käytännössä tällä hetkellä käytetään lähinnä 5 tai 15 minuutin päivitysväliä. Sekä mittausjaksoa että päivitysväliä voidaan muuttaa etänä. Täten esimerkiksi tasejakson muuttumiseen tunnista vartiksi ei aiheuttaisi ongelmia, jos laitetta käytettäisiin kulutusmittarina. Mittaamisen lisäksi mittari hälyttää verkon vioista ja muista häiriöistä, kuten sulakkeiden palamisesta, nollaviasta, keskijännitejohtimen katkeamisesta, jännitesäröstä, välkynnästä, jännitteen kentän vaihtumisesta sekä ali- ja ylijännitteestä. [57]

Tietosuojasta on huolehdittu niin, että normaalitilanteessa yhteyden avaus, tietojen kysely mittarilta sekä parametrien vienti mittarille tapahtuvat mittarikohtaisilla salausavaimilla avatun yhteyden yli. Varsinaisen mittausdatan siirrossa salausavaimia ei käytetä. On kuitenkin mahdollista hyödyntää erillistä luentajärjestelmää, jossa kaikki tiedonsiirto mittarin ja palvelimen välillä tapahtuu salattuna. [57]

Electrixillä on kaksi eri mittaria. Vanhempi näistä on eQL Laatuvahti2, jonka näytteenottotaajuus on 409 Hz. Mitattavia suureita on 75, joita mitataan 10 minuutin jaksolla. Muistia laitteessa on kymmeneksi päiväksi. Uudemmassa eQL Laatuvahti3 -mittarissa näytteenottotaajuutena on 9,8 kHz ja mitattavien suureiden määrää on kasvanut 250 suureen, joita mitataan yhden minuutin jaksolla. Muistia uudessa laitteessa riittää 20 päiväksi. [57]

Electrixin laitteet pystyvät mittaamaan huomattavan määrän erilaisia suureita, joita tarvitaan etenkin sähkönladun mittauksessa. Tavalliselle kotitalousasiakkaalle ei ole normaalitilanteessa tarvetta mitata kaikkia suureita, mitä laite pystyy mittaamaan. Tämän takia Electrixin laitteet eivät ole tavalliselle kotitalousasiakkaalle kustannustehokkaita. Laite maksaa kaikkine ominaisuuksineen noin 2000 – 3000 €, mikä on 10-20-kertainen tavalliseen AMR-mittariin nähden. Teoriassa riisuttu versio laitteesta voisi maksaa tavallisen AMR-mittarin verran. Tällöin laite kykenisi mittaamaan samoja suureita kuin

muutkin AMR-mittarit. Vaikka teoreettinen, riisuttu versio maksaisi vähemmän, ei Electrixillä ole tavoitteena lähteä haastamaan muita mittarivalmistajia AMR-mittarimarkkinoilla. [57]

Kysyntäjousto ei varsinaisesti ole Electrixin agendana – suoraan laiteohjausta ei ole lähdetty tällä hetkellä kehittämään. Sen sijaan yritys on halunnut huomioida tarkasti mittauskriteerit ja siten osaltaan kiinnostunut kysyntäjouston haasteista. Electrix näki siis roolinsa pikemminkin tiedon antajana, joka ilmoittaisi toiselle toimijalle ohjauksen tarpeesta ja tämä toimija toteuttaisi sen. Käytännössä Electrixin laitteita voisi esimerkiksi käyttää suuremman alueen taajuuden mittaamiseen ja ohjaustarpeen ilmoittamisesta muille osapuolille. [57]

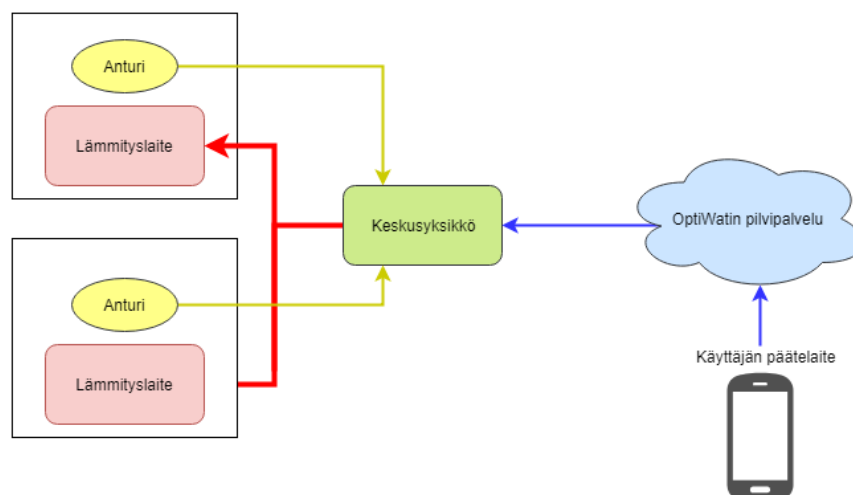
Electrix oli mukana FLEXe-hankkeessa, jossa etsittiin ratkaisuja joustavamman energiajärjestelmän saamiseksi. FLEXe:ssä lähdettiin kehittämään taajuusohjattavien kuormien ohjauksien määrittelyä. Käytännössä taajuudelle määriteltäisiin ylä- ja alarajat etänä ja taajuuden poiketessa näistä laite voisi ohjata kuormia paikallisesti tai lähettää hälytystiedon eteenpäin. Tällöin kuorma voisi olla osa laajempaa ohjauskokonaisuutta. [57]

Electrixin näkemys on kuitenkin se, että yksittäisiä laitteita ei kannata suoraan ohjata taajuusperusteisesti, vaan ohjauksessa pitäisi olla älykkyyttä, joka ymmärtää kokonais kuvan ja osaa ohjata kuormia niin, ettei ohjauksesta ole haittaa verkon näkökulmasta. Näin myös Electrixin laitteilla olisi roolinsa kysyntäjouston toimivuuden takaamisessa. [57]

5.3.4 OptiWatti Oy

OptiWatti tarjoaa lämmityksenhallintajärjestelmää, jossa sähkölämmitteistä kiinteistöä ohjataan ja etähallitaan langattomasti huonekohtaisesti. Näin lisätään rakennuksissa oleskelumukavuutta ja saadaan energiasäästöjä esimerkiksi pienentämällä automaattisesti lämmitystä, kun rakennus on tyhjiällä ja minimoimalla niiltä tunneilla, jolloin sähkön hinta on kallista. Asiakkaina on sekä yritys- että kotitalousasiakkaita. [58]

OptiWatin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 5.2. OptiWatti asentaa kiinteistöön mittauksen ja ohjauksen tarvittavat anturit ja muut laitteet. Järjestelmä voidaan ottaa käyttöön myös valmiisiin lämmitysasennuksiin. Järjestelmässä ei ole omaa näyttöä, vaan käyttäjä voi määritellä haluamansa asetukset käyttämällä omaa päätelaitettaan, kuten matkapuhelinta, tietokonetta tai tablettitietokonetta. OptiWatin keskusyksikkö laskee jokaisen huoneen lämmitystarvetta koko ajan tulevaisuuteen. Laskentaan käytetään muun muassa sähkön hintaa, asiakkaan asettamia asetuksia, ulkolämpötilaa ja sääennustetta. [58]



Kuva 5.2 Optiwatin toimintaperiaate

OptiWatin laitteiston huoneisiin asennetut anturit mittaavat lämpötilaa sekä kosteutta ja lähettävät tiedon näistä kohteen keskusyksikölle, joka opettelee kunkin huoneen lämpökäyttäytymistä. Keskusyksikkö lähettää radiotiedon ohjausreleelle tai ilmalämpöpumpun ohjaukselle. Huonekohtaisia ohjaustietoja on keskusyksikössä viikon ajalle, joten ohjaus ei kärsi Internet-katkoksesta palvelimelle. Käytännössä ohjauksessa huomioidaan myös mitattu ulkolämpötila, neljän päivän sääennusteet ja sähkön tuntihinta pörssisähköasiakkaalle. [58]

OptiWatin järjestelmän hinta riippuu kiinteistön huoneiden määrästä. Järjestelmän maksu on jaettu kahteen osioon: perusmaksuun, joka tässä yhteydessä tarkoittaa investointikustannusta, ja kuukausimaksuun. Asiakas voi valita kolmesta eri maksuvaihtoehdosta, joista on esitetty esimerkki kuuden huoneen kiinteistöstä taulukossa 5.1. Perusmaksuista on vähennetty kotitalousvähennys. [59]

Taulukko 5.1 OptiWatin hintavaihtoehdot kuuden huoneen ja lämminvesivaraajan kokonaisuudelle [59]

	Vaihtoehto A	Vaihtoehto B	Vaihtoehto C
Perusmaksu	0 €	525 €	1225 €
Kuukausimaksu	37,90 €	19,90 €	5,00 €

OptiWatin järjestelmässä ei ole vielä erillistä pätötehomittausta, mutta käyttämätön sähkönkulutus voidaan arvioida lämpökäyttäytymisestä ja releiden ohjaustiedoista. Siihen, mitä OptiWatti tulee kehittämään, riippuu regulaation kehittymisestä. Nyt on jo suunnitelmassa oman tuotannon ja kulutuksen älykästä ohjausta sekä kokonaiskulutuksen ja -tuotannon mittausta. [58]

OptiWatti näkee kysyntäjoustopuolensa tärkeänä asiana, jonka pitää yleistyä sähköjärjestelmän toiminnan takaamiseksi. Lisäksi kysyntäjoustopuoleen liittyy markkinapotentiaalia myös kansainvälisesti. OptiWatilla on yhteistyösopimuksia sähköenergiayhtiöiden kanssa, jotka

auttavat kehittämään ohjattavia kuormia. Tällä hetkellä OptiWatilla on mahdollista ohjata noin 1000 kohdetta, mutta se ei tällä hetkellä kuitenkaan osallistu kysyntäjoustomarkkinoille. [58]

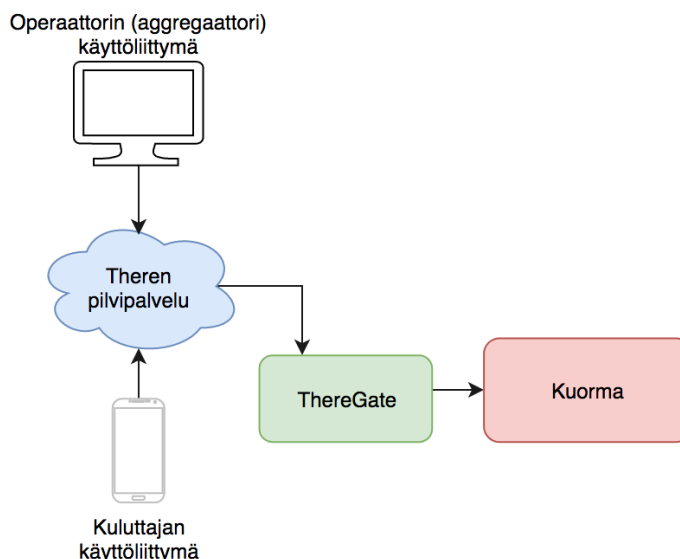
OptiWatti haluaa toteuttaa palvelun niin, että se on huomaamaton asiakkaan näkökulmasta eli ideaalisesti asiakas ei havaitse kuormanohjausta ja hyötyy siitä rahallisesti. Aktiivinen osallistuminen eri sähkömarkkinapaikoilla voi vähentää kuormanohjauksen piirissä olevan asiakkaan tyytyväisyyttä, jos se vaikuttaa esimerkiksi asunnon lämpötilaan näkyvästi. Optiwatti pyrkii toteuttamaan palvelun minimoimalla mahdolliset häiriöt asiakkaalle. [58]

OptiWatti uskoo tulevaisuuden pienasiakkaiden kysyntäjoustoperustuvan pääasiassa erillisen lämmönhallintajärjestelmän ohjauksen kautta sähkömittariohjauksen sijasta. Tätä puoltaisi seikka, että OptiWatin haastatteluihin perustuvan arvion mukaan ainoastaan 30 % sähkömittareiden releistä on kytketty kuormiin, joten kysyntäjousto sähkömittareiden kautta ei välttämättä vähentäisi tarvittavien asennusten määrää. Lämpöohjausjärjestelmän lämpömittausten avulla voidaan varmistaa asiakkaiden tyytyväisyys. [58]

5.3.5 There Corporation Oy

There Corporation (jatkossa There) on kodin lämmityksenhallintajärjestelmän tuottaja. Sen loppuasiakkaat ovat kotitaloudet, joille on useimmiten tarjottu palveluita energiayhtiöiden kautta. Theren ohjausyksikkö ja lämpötila-anturit asennetaan asiakkaan kotiin, jonka lämmitystä ohjaillaan ohjelmiston ja radio-ohjattavien releiden avulla. Theren ohjausyksikön hinta on noin 110 €. Ohjelmisto toimii sekä Theren pilvipalvelussa, että ohjausyksikössä, jotta lämmitysjärjestelmä toimisi myös Internet-yhteyden katketessa. Theren järjestelmää voidaan käyttää sähkölämmityksen, lämminvesivaraajan ja öljylämmitteisen varaajan säätelyyn. Theren ohjelmistoa käytetään myös sulautetuissa järjestelmissä, esimerkiksi Jäsپی Älyvaraajassa. [60]

Kuvassa 5.3 on esitelty Theren järjestelmän toimintaa. Käytännössä järjestelmä koostuu asiakkaan luona toimivasta ThereGate-laitteesta sekä Theren pilvipalvelusta. Asiakkaan koti jaetaan eri vyöhykkeisiin, esimerkiksi ylä- ja alakertaan, joiden lämmitystarve voidaan arvioida tarkkaan laskemalla. Tarkempi, esimerkiksi huonekohtainen, jaottelu ei ole tarpeen, koska lämpö pääsee yleensä siirtymään huoneesta toiseen avoimien ovien kautta. Asiakas ilmoittaa puhelimen tai tietokoneen avulla haluamansa lämpötilan eri vyöhykkeille sekä ajankohdat, jolloin hän on kotona. Tunteina tai päivinä, jolloin asiakas ei ole kotona, voidaan lämmitys säätää alemmas. There saa päivittäin seuraavan päivän sähkön tuntikohtaiset hintatiedot Elspot-markkinoilta ja lähettää ne laitteilleen laskentaa varten. Ohjelmisto laskee lämmitykseen halvimmat tunnit, joilla toteutetaan asiakkaan asettamat toiveet. Laskennoissa huomioidaan myös sääennuste. [60]



Kuva 5.3 Theren järjestelmän toimintaperiaate [61]

Theren järjestelmä ei välttämättä tarvitse sähkömittaria toimiakseen, koska laskennoilla ja mallintamalla päästään varsin tarkkoihin tuloksiin, mutta jos sähkömittaria käytetään, mitataan pätötehoa alle sekunnin välein eli käytännössä reaaliaikaisesti. Mittauksia lähetetään minuutin välein. Mittaus- ja lähetystiheyksiä tosin voidaan muuttaa tarvittaessa. Pätötehon lisäksi olisi mahdollisuus asiakkaan oman tuotannon mittaamiseen, mutta sitä ei ole vielä tuotu Suomen markkinoille pienasiakkaiden aurinkosähköjärjestelmien vähäisyyden takia. Laitteeseen olisi mahdollista saada taajuudenmittaus tai kuormaa voisi ohjata taajuuden perusteella. [60]

Kysyntäjoustossa There toimii aggregaattorina eli se mittaa kuorman määrän ja ohjaa sitä. Se pystyy keräämään tiedon joustavasta kuormasta ja lähettämään eteenpäin. Fingridiä varten Therellä on ollut käytössä pilottijärjestelmä, jossa Fingrid voi ilmoittaa halutusta alas- tai ylössäädöstä ja nappia painamalla tämä toteutuisi. Pilotissa There on mitannut ohjausnopeuden olleen lähes aina alle sekunnin ja pisimmillään 1,6 sekuntia uudelleenlähetyksen takia. Sähkömarkkinaosapuolena There ei halua itse toimia. [60]

Theren laitteen antamat hälytykset ovat parametroitavissa. Se voi hälyttää muun muassa liian matalista lämpötiloista, puuttuvasta paristosta ja yhteysongelmista. Hälytys lähetetään asiakkaan valinnan mukaan joko sähköpostilla tai tekstiviestillä. Lisäksi voidaan määritellä, millä aikaväleillä hälytysviestejä halutaan vastaanottaa. Tietoliikenneongelmien sattuessa There tutkii tilanteen, jos laitteeseen ei ole saatu yhteyttä vuorokauteen. Laite säilyttää mittaustietoja kuukausia. [60]

Theren tietoturvasta on huolehdittu salaamalla yhteydet ja käyttämällä sertifikaatteja. Asiakkaan laite ottaa aina yhteyden Theren järjestelmään, joten asiakkaan laitteessa ei ole yhtään tietoliikenneporttia auki. Kaikki ohjelmistot voidaan päivittää etänä. [60]

There näkee tulevaisuuden kysyntäjoustop tapahtuvan todennäköisemmin energiahallintajärjestelmien kautta. Järjestelmän hyvänä puolena nähdään, että se mittaa lämpötilaa ja

eikä siis ohjaa sokeasti. Näin varmistetaan asiakkaiden tyytyväisyys. Energiahallintajärjestelmät pitää erikseen asentaa, mikä voisi olla heikkous verrattuna kohteessa valmiina olevaan älykkääseen sähkömittariin, mutta kysyntäjoustopuoleen osallistuminen vaatii joka tapauksessa useissa kohteissa valmiiden asennusten tarkistusta. [60]

5.4 Yhteenveto toimijoista

Toimijoiden keskuudessa oli jonkin verran mielipide-eroja kysyntäjoustopuoleen toteutustavan välillä. Erityisesti lämmityksen ohjaukseen erikoistuneet yritykset kannattivat kysyntäjoustopuoleen hoitamista tulevaisuudessa ensisijaisesti kodin energiahallintajärjestelmän kautta. Tämän koetaan varmistavan asiakastyytyväisyyden, koska ohjausta ei tehdä, jos asunnon lämpötila ei ole asetetuissa rajoissa. Toisaalta sähkömittareiden kannalla olevat kokivat sähkölämmityksen ohjaamisen niin pienenä häirintänä, että sitä voi jatkossakin ohjailta sähkömittareiden releohjauksella.

Haastateltujen toimijoiden laitteiden kyky osallistua eri sähkömarkkinapaikoilla vaihteli huomattavasti. Theren laitteella voisi osallistua esimerkiksi taajuusreserveihin, kun taas muilla on tiedonvaihdon hitauden takia lähinnä mahdollisuudet Elspot- ja Elbas-markkinoille.

Tulevaisuuden suunnitelmia kysyttäessä erityisesti sähkömittarivalmistajat ovat kiinnostuneita tulevista pakollisista linjauksista ennen omien laitteiden tuotekehityksen nopeuttamista. Heidän ensisijaiset asiakkaat ovat sähköverkkoyhtiöt, jotka odottavat mittarin iän olevan yli kymmenen vuotta. Tuona aikana tekniikka ehtii kehittyä, joten turhanpäinen ennakointi ei ole järkevää. Esimerkiksi kuorman jatkuvalla ohjauksella ei ole ollut vielä kysyntää, mikä osaltaan selittää toistaiseksi heikot edellytykset muille kuin Elspot- ja Elbas-markkinoille osallistumisen.

6. KYSYNTÄJOUSTON KANNATTAVUUS

Kysyntäjoustopuoleiden yleistymisen kannalta on tärkeää, että sen tarjoamisesta hyötyvät kaikki osapuolet taloudellisesti. Taloudellista hyötyä on hakemassa niin sähkömarkkinaosa-puoli, aggregaattori kuin kulutuskohde. Siksi mahdollisia tuottoja arvioidaan kannattavuuslaskelmilla.

Laskelmissa on arvioitu tuottoja, jotka olisi mahdollista saada osallistumalla taajuusohja-tulle häiriöreservi- (FCR-D) ja säätösähkömarkkinoille (mFRR). Nämä markkinat valittiin, koska niiltä voisi odottaa tuottoja, mutta niille on pienen tai keskisuuren kulu-tuskohteen vielä uskottavaa osallistua. Esimerkiksi säätökapasiteettimarkkinoilla on käytössä viikkomarkkinat, johon kaupankäynti tehdään edellisviikon tiistaina. Näin edel-lisellä tunnilla käytävät säätösähkömarkkinat soveltuvat paremmin usean pienkulutuskohteen kuormamäärän ennakointiin. Toisena esimerkkinä taajuusohjatussa käyttöreservissä säätöjä tapahtuu useita kertoja tunnissa sekä ylös että alas, mikä on työ-läämpää verrattuna harvoin aktivoituvaan ja vain alas säätävään häiriöreserviin. Lisäksi voidaan laskea, minkälaiset tuotot voi saada osallistumalla molemmille markkinoille. Tämä on mahdollista, jos taajuusohjatusalle häiriöreserville annettua tarjousta ei hyödyn-netä, jolloin sitä voi tarjota vielä säätösähkömarkkinalle. Se, että osallistutaanko yhdelle vai kahdelle markkinapaikalle, huomioidaan aggregaattorin palvelumaksuissa, jotka vä-hennetään kuukausittaisista voitoista. Käsiteltävien markkinoiden kaupankäyntitiedot haettiin Fingridin sivuilta ajalta 1.1.–31.8.2018 vertailua varten.

Se, minkälaisista kuormista kysyntäjoustopuoleita tarjotaan, vaikuttaa tarvittavien ohjauslaittei-den määrään ja näin alkuinvestoinnin suuruuteen. Itse laitteen hinnan lisäksi alkuinvestointiin kuuluu myös asennuksen hinta. Markkinoille tarjottavien kysyntäjous-tojen kuormista käytetään alkuun kolmea eri versiota. Ensimmäisessä versiossa kuorma koostuu ainoastaan pienkuluttajista, joiden ohjauksessa käytettävän yksittäisen kuorman suuruus on 3-5 kW. Toisessa versiossa kuorma koostuu yksinomaan keskisuurista kulut-tajista, esimerkiksi kaupoista, joiden ohjattavissa oleva kulutus on 10-20 kW. Viimeisessä versiossa kuorma hyödynnetään kumpaakin kuluttajatyyppeä eli markkinoille tarjotta-vasta kysyntäjoustopuoleita tulisi pienkuluttajilta ja puolet keskisuurilta kuluttajilta. Jatkossa tätä kutsutaan yhdistelmäkuormaksi. Kuormat vaikuttavat muun muassa alkusi-joituksen suuruuteen. Laskelmissa yhden kohteen laitteen hinnaksi on oletettu 110 € ja asennuksen hinnaksi 99 €. Asennuksen hinnan perustana on käytetty Fortum Fiksu Ener-giaseurannan laitteen asentamisen hintaa [62].

Taulukossa 6.1 on esitetty arvioita FCR-D- ja mFRR-markkinoilta saatavista kuukausi-voitoista, jos markkinoille osallistutaan erilaisilla 5 MW kokonaiskuormituksella ja tarjoushinnoilla. Taulukkoon 6.2. on kerätty arvioituja voittoja, kun osallistutaan sekä FCR-D- ja mFRR-markkinoille eri tarjoustasoilla. Selkeyden vuoksi tässä on esitetty vain yhdistelmäkuormalla saatuja tuloksia. Ainoina kuluina otetaan huomioon tarvittavien

laitteiden kustannusten takaisinmaksu, jonka maksuajaksi on oletettu 10 vuotta. Kulutuskohteiden määrä on ensimmäisissä laskennoissa asetettu mahdollisimman pieneksi, kun yksittäiset kohteet ovat teholtaan edellisessä kappaleessa mainittujen tehoalueiden alarajan suuruisia, eli pienten kulutuskohteiden määrä on $5 \text{ MW} : 3 \text{ kW} = 1667 \text{ kpl}$. Keskisuurten kulutuskohteiden määräksi samalla laskentalogiikalla saadaan $5 \text{ MW} : 10 \text{ kW} = 500 \text{ kpl}$. Näistä tehdyn yhdistelmäkuorman eri kulutuskohteiden määrä taas on $5 \text{ MW} : \frac{10 \text{ kW} + 3 \text{ kW}}{2} = 1083 \text{ kpl}$. Laskennassa on myös oletettu, että kysyntäjoustoon osallistutaan aina, kun markkinoilla on ollut 5 MW joustolle tarvetta ja tarjoustaso on ylitetty.

Taulukkoon kerätyistä tuloksista huomataan, että yhdelle markkinalle osallistuttaessa teoriassa olisi kannattavaa tarjota joustoa hyvinkin alhaiseen hintaan paremman voiton saamiseksi. Tämä johtuu markkinoiden toimintatavasta, jossa kaikki tarjouksensa läpisaaneet saavat saman hinnan markkinalta. Käytännössä siis kaikki saavat korkeimman käytetyn tarjoushinnan mukaisen korvauksen. Antamalla alhaisen tarjouksen toimija voi varmistaa pääsynsä markkinalle. Tarjottavista kuormista kannattavin on odotetusti keskisuurilla kulutuskohteilla koostettu kuorma, koska siihen vaadittu alkusijoitus on pienin vähäisemmän laitteistomäärän takia. Yksittäin markkinapaikoista säätösähkömarkkinoilta on odotettavissa paremmat tuotot, mutta vielä parempi voitto on saatavissa osallistumalla molemmille markkinoille. Tässä tilanteessa teoriassa suurimpaan voittoon päästään tarjoamalla FCR-D-markkinalle suurella tarjoustasolla ja kaupan jäätyä toteuttamatta tarjotaan kuormaa mahdollisimman pienellä tarjoustasolla säätösähkömarkkinoille. Käytännössä siis hyödynnetään häiriöreservistä vain harvat hyvin kalliit tunnit, mutta muutoin osallistutaan vain säätösähkömarkkinoilla.

Taulukko 6.1 Kuukausivoitot erilaisilla kuormilla ja tarjoustasoilla

FCR-D	Kuorma	Tarjous			
		2 €/MW	5 €/MW	7 €/MW	10 €/MW
	Pienet kulutuskohteet	22560	15727	14693	14213
	Keskisuuret kulutuskohteet	24592	17759	16725	16245
	Yhdistelmä	32836	16743	15709	15229
mFRR	Kuorma	10 €/MW	25 €/MW	40 €/MW	55 €/MW
	Pienet kulutuskohteet	51192	51166	43344	27763
	Keskisuuret kulutuskohteet	53224	53198	45376	29795
	Yhdistelmä	48217	52182	44360	28779

Taulukko 6.2 Kuukausivoitot yhdistelmäkuormalla osallistumalla mFRR- ja FCR-D -markkinoille

mFRR/FCR-D	2 €/MW	5 €/MW	7 €/MW	10 €/MW
10 €/MW	29076	58608	59725	59982
25 €/MW	29076	58608	59725	59982
40 €/MW	27858	52376	52922	53154
55 €/MW	25870	40486	40288	40055

Näiden taulukoiden tulokset eivät kuitenkaan ole realistisia, vaikka osoittavatkin hyvin eri markkinoiden hintatason ja eri kuormatyyppien vaikutuksen markkinoilta saatavaan voittoon. Ensimmäisenä ongelmana on liian optimistinen näkemys tarvittavien kulutuskohdeiden määrästä. Laskelman mukaan kaikki kysyntäjoustopuolelle osallistuvat kohteet tarjoaisivat joka tunti koko joustoon tarkoitettua kuormansa. Käytännössä esimerkiksi kotitalous ei lämmittäisi juuri koskaan, jos osallistuu yhtä aktiivisesti kuin mitä laskelmat ehdottaisivat. Kysyntäjoustopuolelle kokonaiskuormaan siis tarvitaan vielä enemmän kuormituksia tarvittavan joustavan tehon varmistamiseksi. Arvion mukaan 1 MW joustoa varten tarvitaan 1000 pienkulutuskohdetta [62]. Tätä arviota käytetään seuraavissa laskelmissa. Tarvittavien keskisuurten kulutuskohdeiden määräksi arvioidaan 350 kpl/1 MW.

Toisena ongelmana on oletus hyvin aktiivisesta osallistumisesta markkinoille. Käsitellyssä olevat markkinat vaativat erilaista valmistautumista joustamiseen. Taajuusohjattu häiriöreservi vaatii kulutuskohdeelta taajuuden mittaamista ja mahdolliseen taajuudenlaskuun reagoimista vähentämällä kulutusta. Käytännössä kulutusta ei välttämättä rajoiteta laisinkaan tai vain sekuntien ajan. Säättösähkömarkkinoilla säätö kestää vähintään yhden minuutin ja yleensä kestää lähelle yhtä tuntia, joten se vaatii kulutuskohdeelta huomattavampaa kuormansäätöä. Käytännössä säättösähkömarkkinoille osallistuva voi rajoittaa ohjausten määrän pariin kertaan vuorokaudessa esimerkiksi asettamalla tarjoustasoksi sopivan suuren tarjouksen. Taulukossa 6.3 on esitetty lähemmin arviota siitä, miten ohjausten määrä vaikuttaa mahdolliseen kuukausivoittoon. Kuormissa käytetään realistisen kokoisia kulutuskohderyhmiä, joten alkusijoituksen takaisinmaksu on suurempi kuin taulukossa 6.1 ja 6.2. Taulukkoon on myös kuluneen vuoden perusteella päätelty, kuinka suurella tarjoustasolla päästään suurin piirtein haluttuun ohjausten määrään. Huomataan, että erotus yhden ja kahden vuorokausiohjauksen välillä on noin 380 €, mutta kahden ja kolmen ohjauksen erotus on enää vain noin 165 €. Tästä ehkä voi jo tehdä varovaisen arvion, ettei runsaasta ohjauksesta saa erityisen paljon suurempaa tuloa.

Taulukko 6.3 Kuukausivoitot osallistumalla molemmille markkinoille ja käyttämällä FCR-D –markkinoilla tarjoustasona 2 €/MW sekä realistisella kuormalla

Ohjausten määrä vuorokaudessa	Säätösähkön tarjoustaso (€/MW)	Pienet kuormat (€)	Keskisuuret kuormat (€)	Yhdistelmä (€)
1	84,99	17996	23656	20826
2	69	18377	24038	21208
3	62,9	18543	24203	21373

Kannatuslaskelmissa merkittävimpana haasteena on kysynnänjouston kaikkien osapuolten hyödyn varmistaminen. Taulukkoihin 6.4, 6.5 ja 6.6 on laskettu arvioita sähkönmyyjälle tulevasta voitosta eri markkinapaikoilla. Lähtötietona markkinoille tarjotaan 5 MW joustoja. FCR-D-markkinalle tarjoustasoksi on asetettu 2 €/MW ja mFRR-markkinalle 84,99 €/MW. Ensimmäisille riveille on laskettu alkuun vertailuksi, mitä sähkönmyyjä saisi, jos tuottoja ei tarvitse jakaa mahdollisille eri tahoille. Osa sähkönmyyjistä voi toisaalta ulkoistaa sähkömarkkinapaikoilla toimimisen jollekin sähkömarkkinapalveluita tarjoavalle yritykselle. Samoin kulutuskohdeiden kerääminen sopivaksi kokonaiskuormaksi ja osalle markkinoista vaaditusta reaaliaikamittauksesta huolehtiminen voidaan jättää erillisen aggregaattorin hoidettavaksi. Toisille riveille on arvioitu sähkönmyyjälle tuleva voitto, kun tuloista on maksettu alkusijoituksen takaisinmaksu ja erilaiset palvelumaksut. Reaaliaikamittauksen kuukausihinnaksi on arvioitu 3 €/kulutuskohde. Palvelumaksun hinnaksi on asetettu 1000 €/kk, kun kauppaa käydään yhdellä markkinapaikalla, ja 1500 €/kk, kun kauppaa käydään molemmilla markkinapaikoilla. Lisäksi sähkönmyyjä saattaa haluta houkutella asiakkaita kysyntäjoustoan joteenkin, jotta nämä hyväksyisi helpommin esimerkiksi lämmityksen ohjauksen. Kolmansille riveille on laskettu, kuinka paljon sähkönmyyjälle tulisi voittoa, jos alkusijoituksen takaisinmaksun ja palvelumaksujen maksamisen lisäksi sähkönmyyjä hyvitäisi loppukuluttajalle sähkösopimuksen perusmaksun. Tarkastelemalla useamman sähkönmyyjän sähkösopimusten maksuja perusmaksujen suuruus vaihteli 2,00–5,00 € välillä, joten laskelmissa käytetään korvausmaksuna 3,50 €/kk. Toisaalta sähkönmyyjän ei välttämättä tarvitse hankkia tai hankittua kulutuskohteisiin laitteita kysyntäjousto varten, jos kohteissa on jo valmiiksi sopivat laitteet, esimerkiksi ohjaukseen sopiva sähkönkulutusmittari. Siksi vielä viimeisille riveille on arvioitu sähkönmyyjän voitto, jos tuloista maksetaan palvelumaksut ja korvaukset kulutuskohteille.

Taulukko 6.4 Kuukausivoitto pienillä kuormilla

	FCR-D (€)	mFRR (€)	molemmat markkinapaikat (€)
Voitto laiteinvestoinnin kuukausivähennyksen jälkeen	16755	8871	17996
Voitto palvelumaksujen ja mittauskulujen jälkeen	755	-7129	1496
Voitto loppukuluttajien hyvitysten jälkeen	-16745	-24629	-16004
Voitto, jos laiteinvestointeja ei tarvita	-8037	-15921	-7296

Taulukko 6.5 Kuukausivoitto keskisuurilla kuormilla

	FCR-D (€)	mFRR (€)	molemmat markkinapaikat (€)
Voitto laiteinvestoinnin kuukausivähennyksen jälkeen	22415	14531	23656
Voitto palvelumaksujen ja mittauskulujen jälkeen	16165	8281	16906
Voitto loppukuluttajien hyvitysten jälkeen	10040	2156	10781
Voitto, jos laiteinvestointeja ei tarvita	13088	5204	13829

Taulukko 6.6 Kuukausivoitto yhdistelmäkuormalla

	FCR-D (€)	mFRR (€)	molemmat markkinapaikat (€)
Voitto laiteinvestoinnin kuukausivähennyksen jälkeen	19585	11701	20826
Voitto palvelumaksujen ja mittauskulujen jälkeen	8460	576	9201
Voitto loppukuluttajien hyvitysten jälkeen	-3352	-11237	-2612
Voitto, jos laiteinvestointeja ei tarvita	2526	-5359	3267

Taulukoista voidaan nähdä, että kuluneen vuoden markkinadatan sekä käytettyjen kustannusten ja laskentamenetelmien perusteella on erityisen haastavaa saada pienkuluttajien jousto kannattavaksi, sillä pelkästään pienkuluttajia sisältävällä kuormalla sähkönmyyjä tekisi tappiota useassa tapauksessa. Sen sijaan toiminta pelkästään keskisuurilla kuluttajilla koostetulla kuormalla näyttäisi olevan kaikissa tapauksissa kannattavaa.

Laskelmiin on kuitenkin suhtauduttava kriittisesti. Menneisyyden markkinoita arvioimalla ei saada tarkkaa tietoa tulevaisuuden markkinoista. Markkinahintoihin vaikuttaa vuoden säätilanne sekä markkinoiden kehitys. Luvussa 2 huomioitiin, että FCR-D-markkinoilla on ollut suurta kasvua tarjottavien kuormien määrässä. Tämä voi vaikuttaa tulevaisuudessa markkinahintoihin.

Laskelmissa on oletettu kuorman kooksi 5 MW, koska se on vielä säätösähkömarkkinoille osallistuvan kuorman minimitehovaatimus. Tämä on kuitenkin muuttumassa, kuten luvussa 4 kerrottiin. Euroopan sähkömarkkinatuotteiden yhtenäistämisen yhteydessä minimikuorma laskee 1 MW:iin. Tämä vaikuttaa merkittävästi maksuihin, jotka ovat suoraan yhteydessä kulutuskohteiden määrään. Näihin kuuluu siis niin alkusijoituksen koko, reaaliaikamittauksesta aiheutuvat kustannukset sekä asiakkaille annettavan korvauksen määrä. Toisaalta tämä voi helpottaa säätösähkömarkkinoille osallistumista ja näin vaikuttaa säätösähkömarkkinoiden hintatasoihin.

Lisäksi luvussa 4 Fingridin haastattelussa selvisi, ettei jokaisesta kulutuskohteesta ole tarvetta saada reaaliaikaista mittaustietoa. Jos kulutuspaketeista tehdään osittain tilastollisesti mallinnettuja, säästetään asentamalla reaaliaikamittauksen mahdollistavat laitteet vain osaan kulutuskohteista.

Toisaalta pienasiakkaita voidaan houkutella kysyntäjoustoon rahallisen korvauksen sijasta myös hyvällä palvelulla. Esimerkiksi Fortum tarjoaa Fiksu Energiaseurannan, josta perusmaksun ja asennuksen maksamalla asiakas voi seurata kulutustaan reaaliaikaisesti, ohjata lämminvesivaraajaa etänä ja saa tietoa kysyntäjoustopon vaikutuksista [63].

7. YHTEENVETO

Euroopan unionin sekä kansallisten päätösten takia uusiutuvan energian osuus kokonaistuotannosta on kasvanut ja tulee jatkossakin kasvamaan. Sääriippuvan uusiutuvan sähköntuotannon lisääminen ja samaan aikaan perinteisten voimalaitosten alasajo asettavat haasteita Suomen sähkövoimajärjestelmälle. Sähköntuotannon ohjattavuuden heikentyessä ratkaisuna voidaan lisätä kysyntäjoustoa. Suurteollisuus on jo pitkään hyödyntänyt kysyntäjoustoa. Keskisuurilla ja pienillä kulutuskohdeillakin on kysyntäjoustopotentiaalia ja sen hyödyntäminen toisi lisää joustoa markkinoille. Pienempien kulutuskohdeiden laajamittainen osallistuminen kysyntäjoustopotentialiin voisi onnistua esimerkiksi aggregointia hyödyntäen.

Diplomityön tavoitteena oli selvittää, minkälaiset tekniset mahdollisuudet keskisuurilla ja pienillä kuluttajilla on osallistua kysyntäjoustopotentialiin eri markkinoilla. Lisäksi työssä oli tavoitteena selvittää, miten taloudellisesti kannattavaa kysyntäjoustopalvelun tarjoaminen olisi sähköntuotannolle kyseisille kuluttajille. Työssä selvitettiin eri markkinapaikkojen vaatimuksia kysyntäjoustopotentialiin osallistuvilta toimijoilta ja laitteistoilta. Eri markkinapaikat asettivat vaatimuksia esimerkiksi tarjottavan kuorman minimimäärään, kuorman ohjausnopeuteen sekä mittaustietojen lähetystiheyteen. Samalla selvitettiin myös tulevaisuuden muutoksia markkinoiden ehtoihin. Tietoja nykyisistä ja tulevaisuuden vaatimuksista selvitettiin koostamalla Fingridin eri tietolähteistä sekä haastattelemalla Fingridiä.

Työssä selvitettiin nykyisten jo asennettujen kysyntäjoustopotentialissa hyödynnettävien laitteiden teknisiä ominaisuuksia ja peilattiin ominaisuuksia eri markkinapaikkojen asettamiin ehtoihin. Laitteiden teknisten ominaisuuksien selvitystä varten haastateltiin viittä alalla toimivaa yritystä. Haastateltavat yritykset pyrittiin valitsemaan niin, että tietoa saadaan erityyppisiltä toimijoilta. Haastateltavien yritysten joukossa oli yrityksiä, jotka toimittivat kodin energianhallintajärjestelmiä, sähkölaatumittareita sekä etäluettavia sähkömittareita. Laitteiden teknisten ominaisuuksien ja tietoturvan lisäksi selvitettiin kyseisten yritysten näkemyksiä kysyntäjoustopotentialista ja markkinoiden kehittymisestä kysyntäjoustopotentialiin liittyen.

Haastatteluiden perusteella on selvää, että nykyisillä laitteilla voidaan varsin ongelmitta toimia sekä Elspot- että Elbas-markkinoilla kysyntäjoustopotentialin näkökulmasta. Laitteita kytetään ohjaamaan sekä suoraan että kalenteriperusteisesti riittävän nopeasti, että markkinoiden ehdot täyttyvät. Sen sijaan nykyisillä laitteilla Fingridin reservimarkkinoille osallistuminen ei onnistuisi suurimmalta osalta laitteista ilman tuotteiden jatkokehitystä. Etäluettavien mittareiden tapauksessa asennettavat mittarimäärät ovat suuria, jolloin pyritään optimoimaan kustannuksia, eikä ylimääräisiä mahdollisesti tarpeettomia ominaisuuksia lähdetä toteuttamaan kustannussyistä. Toisaalta taas kodin energianhallintajärjestelmillä reservimarkkinoille osallistuminen olisi mahdollista, sillä yhteydet ovat kuluttajan matkapuhelinverkon kautta kiinni järjestelmien pilvipalveluissa ja järjestelmät ovat ohjattavissa hyvin nopeasti.

Haastatteluissa oli selkeästi havaittavissa erot erilaisten toimijoiden välillä. Etäluettavien sähkömittareiden toimittajien asiakkaat ovat ensisijaisesti sähköverkkoyhtiöitä, joiden tarpeisiin tuotekehitys pyrkii vastaamaan. Etäluettavien sähkömittareiden hankintamäärät ovat huomattavan suuria, jolloin jo pienikin lisäkustannus vaikuttaa merkittävästä kokonaishankintahintaan. Tämän takia sähkömittareiden toimittajat tekevät päätöksiä sen perusteella, mitä tulevaisuuden AMR-mittarisukupolven vaatimuksiksi esitetään. AMR-mittareiden elinkaaret ovat myös huomattavan pitkiä, jolloin uusia valinnaisia ominaisuuksia ei voi niin helposti tuoda markkinoille. Kodin energianhallintajärjestelmien valmistajat pystyvät tuotekehityksessään vastaamaan nopeammin loppukäyttäjän sekä sähkönmyyjien tarpeisiin ja näin ratkaisemaan kysyntäjoustopuoleen haasteita nopeammin. Toisaalta AMR-mittareita on nykyään asennettu käytännössä jokaiseen kulutuspisteeseen, minkä takia niiden hyödyntäminen kysyntäjoustopuolella on kodin energianhallintajärjestelmiä taloudellisesti houkuttelevampaa. Kysyntäjoustopuoleen laajamittainen käyttöönotto millä tahansa laitetypillä vaatii toimijoiden välistä yhteistyötä sekä käytettävien laitteistojen tiedonvälityksen standardointia.

Diplomityössä arvioitiin kysyntäjoustopuoleen taloudellista kannattavuutta sähkönmyyjän näkökulmasta. Taloudellista kannattavuutta arvioitiin käyttämällä kuluvan vuoden 2018 markkinatietoja taajuusohjatulta häiriöreserviltä sekä säätösähkömarkkinoilta. Kysyntäjoustopuolen kuluja laskettiin arvioimalla tarvittavan laitteistojen hankinnan ja asentamisen kuluja, mahdollisten kolmannelta osapuolelta ostettujen reaaliaikamittauksien käsitteystä ja palveluista aiheutuvia kuluja sekä asiakkaille tarjottavasta korvauksesta aiheutuvaa kuluja. Laskelmissa huomioitujen lähtötietojen perusteella pienien kuluttajien osallistuminen kysyntäjoustopuoleen on taloudellisesti haastavaa. Samoilla lähtötiedoilla keski suurten kuluttajien osallistuminen kysyntäjoustopuoleen oli selvästi taloudellisesti kannattavaa jo nykyisillä laitteilla.

Tulevaisuuden kehitys tulee muuttamaan eri kuluttajatyyppeiden kysyntäjoustopuoleen osallistumisen kannattavuutta. Nykyiset markkinatiedot eivät kuvaa tulevaisuuden markkinatilannetta. Erityisesti taajuusohjatulla häiriöreservillä tarjotussa kysyntäjoustopuoleen määrässä on ollut viime aikoina huomattavaa kasvua, joka vaikuttaa osaltaan hintatasoon. Markkinapaikkojen ehtojen muutokset tulevat myös osaltaan vaikuttamaan kysyntäjoustopuoleen kannattavuuteen eri kuluttajatyypeillä. Ehtojen muutoksista aiheutuvaa lopullista vaikutusta on kuitenkin hankala arvioida.

LÄHTEET

- [1] Energia, Euroopan Unioni, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 15.10.2018): https://europa.eu/european-union/topics/energy_fi
- [2] O. Honkatukia, Pariisin ilmastosopimus, Ympäristöministeriö, 11.5.2016, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 15.10.2018): <http://www.ym.fi/pariisi2015>
- [3] Ratkaisujen Suomi - Pääministeri Juha Sipilän hallituksen strateginen ohjelma, Valtioneuvoston kanslia, 29.5.2015, Saatavissa (viitattu 16.10.2018): https://valtioneuvosto.fi/documents/10184/1427398/Ratkaisujen+Suomi_FI_YHDISTETT_Y_netti.pdf
- [4] Kulutuksen ja tuotannon tasapainon ylläpito, Fingrid, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 15.10.2018): <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/kulutuksen-ja-tuotannon-tasapainon-yllapito/#taajuusmittaus-data>
- [5] K. Takala, Säättövoima - säädettävää sähköntuotantoa, Energiateollisuus, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 15.10.2018): https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/saatovoima
- [6] K. Käsälä, K. Hammar, Säättövoimaa tulevaisuuden sähkömarkkinalle, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, 2018, Saatavissa (viitattu 15.10.2018): https://www.vtt.fi/inf/pdf/whitepapers/VTTWhitePaper2018-Saatovoimaa_tulevaisuuden_sahkomarkkinalle.pdf
- [7] T. Huttunen, Vesivoimalla eniten uusiutuvaa sähköntuotantoa, Energiateollisuus, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 15.10.2018): https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/vesivoima
- [8] Kysyntäjousto, Fingrid, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 15.10.2018): <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto>
- [9] Säätosähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat, Fingrid, Saatavissa (viitattu 15.10.2018): <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahko--ja-saatokapasiteettimarkkinat/>
- [10] J. Kostama, Sähköntuotanto, Energiateollisuus, Saatavissa (viitattu 15.10.2018): https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto
- [11] 100-prosenttisesti uusiutuviin energialähteisiin: Kansalliseen energia- ja ilmastostrategiaan liittyvä tarkastelu, Työ- ja elinkeinoministeriö, 24.11.2016,

- Saatavissa (viitattu 16.10.2018): <https://tem.fi/documents/1410877/3570111/100+prosenttia+uusiutuva+tarkastelu.pdf/8e4ee341-77c5-4447-b6ce-1f2686a3daec/100+prosenttia+uusiutuva+tarkastelu.pdf.pdf>
- [12] A. Aalto, N. Honkasalo, P. Järvinen, J. Jääskeläinen, M. Raiko, A. Sarvaranta, Mistä lisäjoustoa sähköjärjestelmään? Loppuraportti, ÅF-Consult Oy, 16.11.2012, Saatavissa (viitattu 15.10.2018): https://energia.fi/files/694/Mista_lisajoustoa_sahkojarjestelmaan_loppuraportti_28_11_2012.pdf
- [13] Säännöt tehoreservijärjestelmään kuuluvien voimalaitosyksiköiden käyttövalmiuden ylläpidolle, niiden käytölle sekä tuotetun sähkön tarjoamiseen markkinoille, Fingrid, 15.1.2015, Saatavissa (viitattu 16.10.2018): <https://www.energiavirasto.fi/documents/10179/0/Fingrid+Tehoreservin+k%C3%A4ytt%C3%B6s%C3%A4%C3%A4nn%C3%B6t+2015+tuotanto.pdf/06d25187-719f-4092-b0a1-3367393200f9>
- [14] K. Ollikka, Miten sähkömarkkinat toimivat?, Smart Energy Transition, 12.5.2017, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 15.10.2018): <http://smartenergytransition.fi/fi/miten-sahkomarkkinat-toimivat/>
- [15] Fysisk flyt, Statnett, verkkosivu, Saatavissa: <http://driftsdata.statnett.no/Web/Map/>
- [16] T. Rautiainen, M. Klimscheffskij, M. Bröcklm J. Vanhanen, Vaikutustenarvio työ- ja elinkeinoministeriön älyverkkotyöryhmän esittämistä toimista, Gaia Consulting Oy, 8.10.2018, Saatavissa (viitattu 16.10.2018): <https://tem.fi/documents/1410877/3481825/Vaikutustenarvio+%C3%A4lyverkkoty%C3%B6ryhm%C3%A4n+esitt%C3%A4mist%C3%A4+toimista%2C+8.10.2018/0452e52fec04-4e42-98f2-66cb6b0b79b9/Vaikutustenarvio+%C3%A4lyverkkoty%C3%B6ryhm%C3%A4n+esitt%C3%A4mist%C3%A4+toimista%2C+8.10.2018.pdf>
- [17] S. Honkapuro, J. Haapaniemi, J. Haakana, J. Lassila, J. Partanen, K. Lummi, A. Rautiainen, A. Supponen, J. Koskela, P. Järventausta, Jakeluverkon tariffirakenteen kehitysmahdollisuudet ja vaikutukset, LUT Scientific and Expertise Publications, No. 65, 18.8.2017, Saatavissa (viitattu 18.10.2018): https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/143710/Tariffirakennetutkimus_LUT_TUT_raportti_final.pdf?sequence=2
- [18] J. Partanen, S. Viljainen, J. Lassila, S. Honkapuro, K. Salovaara, S. Annala, M. Makkonen, Sähkömarkkinat – opetusmoniste, LUT, 2016
- [19] P. Järventausta, S. Repo, P. Trygg, A. Rautiainen, A. Mutanen, K. Lummi, A. Supponen, J. Heljo, J. Sorri, P. Harsia, M. Honkiniemi, K. Kallioharju, V. Piikkilä, J. Luoma, J. Partanen, S. Honkapuro, P. Valtonen, J. Tuunanen, N. Belonogova,

- Kysynnän jousto – Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkko-yhtiöille (DR pooli) –Loppuraportti, TUT, 2015, Saatavissa (viitattu 15.10.2018): https://tutcris.tut.fi/portal/files/4776899/kysynnan_jousto_loppuraportti.pdf
- [20] P. Vihavainen, Kysyntäjousto tehokkaasti käyttöön, Fingrid, 21.11.2013, Saatavissa (viitattu 15.10.2018): https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/ajankohtaista-tapahtumat/tasevastaavapaiva-2013/06_kysyntajouston-pilottiprojektit_tasevastaavapaiva-21112013.pdf
- [21] J. Rantanen, Kysyntäjousto akkupohjaisissa älykkäissä sähköverkoissa, HAMK, 2017, Saatavissa (viitattu 15.10.2018): https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/126349/Rantanen_Juha-Pekka.pdf?sequence=1
- [22] Kysyntäjousto, Fingrid, 18.1.2018, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 16.10.2018): <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/>
- [23] J. Abaravicius, Demand Side Activities for Electric Load Reduction, Lund University, kesäkuu 2017, Saatavissa (viitattu 16.10.2018): <http://www.ees.energy.lth.se/fileadmin/ees/Publikationer/2007/Abaravicius-PhD-Thesis-Final.pdf>
- [24] P. Koponen, S. Kärkkäinen, J. Farin, H. Pihala, Markkinahintasignaaleihin perustuva pienkuluttajien sähkönkäytön ohjaus –Loppuraportti, VTT, lokakuu 2006, Saatavissa (viitattu 16.10.2018): <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2006/T2362.pdf>
- [25] J. Kiviluoma, N. Helistö, Selvitys tehoreservin tarpeesta vuosille 2015–2020, VTT, 17.12.2014, Saatavissa (viitattu 16.10.2018): <https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2014/VTT-R-06032-14.pdf>
- [26] S. Pyykkö, myynti-insinööri, Kamstrup A/S, Skype-haastattelu 26.4.2018
- [27] Sähkötöimitusehdot STE 2014, Energiateollisuus, Saatavissa (viitattu 16.10.2018): https://energia.fi/files/1054/Sahkontoimitusehdot_STE_2014_20160118.pdf
- [28] T. Pahkala, H. Uimonen, V. Väre, Matkalla kohti joustavaa ja asiakaskeskeistä sähköjärjestelmää – Älyverkkotyöryhmän väliraportti, Työ- ja elinkeinoministeriö, 9.10.2017, Saatavissa (viitattu 16.10.2018): http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/80792/TEM-rap_38_2017_verkkojulkaisu.pdf

- [29] Price formation, Nord Pool AS, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 19.3.2018):
<https://www.nordpoolgroup.com/the-power-market/Day-ahead-market/Price-formation/>
- [30] Markkinapaikat, Fingrid, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 16.10.2018):
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/markkinapaikat/>
- [31] Day-ahead market, Nord Pool AS, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 19.3.2018):
<https://www.nordpoolgroup.com/the-power-market/Day-ahead-market/>
- [32] Flexi order, Nord Pool AS, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 16.10.2018):
<https://www.nordpoolgroup.com/trading/Day-ahead-trading/Order-types/Flexi-order/>
- [33] ”Säännöt tehoreservijärjestelmään kuuluvien voimalaitosyksiköiden käyttövalmiuden ylläpidolle, niiden käytölle sekä tuotetun sähkön tarjoamiseen markkinoille”, Fingrid, 9.12.2016, Saatavissa (viitattu 16.10.2018):
<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/tehoreservi/kolmivuotiskausi-72017---62020/tehoreservin-kayttosaannot---tuotanto-2017.pdf>
- [34] Bidding areas, Nord Pool AS, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 19.3.2018):
<https://www.nordpoolgroup.com/the-power-market/Bidding-areas/>
- [35] Intraday market, Nord Pool AS, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 19.3.2018):
<https://www.nordpoolgroup.com/the-power-market/Intraday-market/>
- [36] Reservit ja säätösähkö, Fingrid, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 16.10.2018):
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko>
- [37] M. Kuivaniemi, asiantuntija, P. Ruokolainen, suunnitteluinsinööri, Fingrid, Helsinki, Haastattelu 29.6.2018
- [38] Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat, Fingrid, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 16.10.2018):
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahko--ja-saatokapasiteettimarkkinat/>
- [39] Säätökapasiteettimarkkinoiden säännöt, Fingrid, Saatavissa (viitattu 16.10.2018):
<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/saatosahkomarkkinasopimus-liite-2.-saatokapasiteettimarkkinat.pdf>
- [40] Säätösähkömarkkinoiden aggregointipilotti, Fingrid, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 16.10.2018):
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahkomarkkinoiden-aggregointipilotti/>
- [41] Automaattisen taajuudenhallintareservin sovellusohje, Fingrid, 8.8.2016, Saatavissa (viitattu 16.10.2018):

<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/liite20120-20automaattisen20taajuudenhallintareservin20sovellusohje.pdf>

- [42] Automaattinen taajuudenhallintareservi, Fingrid, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 19.3.2018): <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/automaattinen-taajuudenhallintareservi/>
- [43] Säännöt tehoreservijärjestelmään kuuluvien sähkönkulutuksen joustoon kykenevien kohteiden käyttövalmiuden ylläpidolle, niiden käytölle sekä sähkönkulutuksen tarjoamiseen markkinoille, Fingrid, 9.12.2016, Saatavissa (viitattu 16.10.2018): <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/tehoreservi/kolmivuotiskausi-72017---62020/tehoreservin-kayttosaannot---kulutus-2017.pdf>
- [44] Ansaintamallit, Fingrid, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 16.10.2018): <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/kuinka-osallistua-reservimarkkinoille/ansaintamallit/>
- [45] Usein kysyttyjä kysymyksiä etäluettavista sähkömittareista, Turku Energia, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 19.3.2018)
- [46] Asensimme sinulle etäluettavan sähkömittarin, Porvoon energia, Saatavissa (viitattu 16.10.2018): https://pbe2013.jalusta.com/files/download/2013_mittariesite_102013.pdf
- [47] N. Mattila, Etäluettavien sähkömittareiden sähkölaatuominaisuudet, Metropolia Ammattikorkeakoulu, 23.1.2016, Saatavissa (viitattu 16.10.2018): <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/104605/paattotyo.pdf>
- [48] Älyverkkotyöryhmä: Seuraavan sukupolven älykkäiden sähkömittareiden vähimmäistoiminnallisuudet, Pöyry Management Consulting Oy, 15.12.2017, Saatavissa (viitattu 16.10.2018): <https://tem.fi/documents/1410877/3481825/AMR+2.0+loppuraportti+15.12.2017/6a2df7e6-a963-40c0-b4d8-d2533fbca488>
- [49] P. Järventausta, R. Heinimäki, I. Lehto, M. Lindroos, J. Pylvänäinen, M. Hyvärinen, Kuormanohjausrajapinta AMR-mittarin kautta toteutettaviin ohjauksiin – raportti, 4.9.2018, Saatavissa (viitattu 16.10.2018): <https://tem.fi/documents/1410877/3481825/%E2%80%A2%09Kuormanohjausrajapinta+AMR-mittarin+kautta+toteutettaviin+ohjauksiin+4.9.2018/eae9b3c1-9773-4e07-aa00-5e144f78e55f/%E2%80%A2%09Kuormanohjausrajapinta+AMR-mittarin+kautta+toteutettaviin+ohjauksiin+4.9.2018.pdf>
- [50] T. Lehto, Kotiautomaatio uudistuu kerrostaloissa - taloa voi ohjata kännykällä vaikka mökiltä, Tekniikka&Talous, 2.9.2018, Saatavissa (viitattu 16.10.2018):

<https://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/ict/kotiautomaatio-uudistuu-kerrosta-loissa-taloe-voi-ohjata-kannkalla-vaikka-mokilta-6738719>

- [51] H. Liukku, Asuntomessujen omakotikohteista yli kolmasosassa ABB:n kotiautomaatio, ABB, 5.7.2018, Saatavissa (viitattu 16.10.2018): <https://new.abb.com/news/detail/5539/asuntomessujen-omakotikohteista-yli-kolmasosassa-abbn-kotiautomaatio>
- [52] J. Louis, Dynamic environmental indicators for smart homes. Assessing the role of home energy management systems in achieving decarbonisation goals in the residential sector, University of Oulu, 2016, Saatavissa (viitattu 16.10.2018): <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526214535.pdf>
- [53] OptiWatin älyjärjestelmä ohjaa lämmitystä puolestasi, OptiWatti, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 16.10.2018): <https://www.optiwatti.fi/mika-on-optiwatti/toi-mintaperiaate/>
- [54] More comfort, less cost. Automatically., There Corporation, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 16.8.2018): <https://www.therecorporation.com/home-energy-management-for-home-owners/>
- [55] V. Chen a, M. Delmas, W. Kaiser, Real-time, appliance-level electricity use feedback system: How to engage users?, Energy and Buildings 70 (2014) 455–462
- [56] K. Saarhelo, asiakaspäällikkö, J. Pyykkönen, asiakaspäällikkö, Landis+Gyr Oy, Sähköpostihaastattelu, 12.6.2018
- [57] S. Vehviläinen, tekninen johtaja, MX Electrix Oy, Puhelinhaastattelu 8.5.2018
- [58] A. Nieminen, asiakaspäällikkö, OptiWatti Oy, Skype-haastattelu 15.5.2018
- [59] OptiWatin hinnat kotitalouksille, OptiWatti Oy, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 9.8.2018): <https://www.optiwatti.fi/kotitalouksille/hinnoittelu-kotitalouksille/>
- [60] S. Sailo, head of solutions, There Corporation, Helsinki, Haastattelu 24.4.2018
- [61] I. Palola, Kysynnänjouston pilottiprojekti –loppuraportti, There Corporation Oy, 15.2.2016, Saatavissa (viitattu 16.10.2018): <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/kysynnanjouston-pilottiprojekti-loppuraportti-julkinen.pdf>
- [62] Fortum Fiksu Energianseuranta - uusi palvelu suorasähköllä lämmittäville, Fortum, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 16.10.2018): <https://www.fortum.fi/kotiasiakkaille/fiksu-koti/fortum-fiksu-energianseuranta-uusi-palvelu-suorasahkolla-lammittaville>

- [63] T. Kulla, Sähköjärjestelmän perusasioiden äärellä, osa 3: Miten kysyntäjousto toimii säätövoimana?, Fortum ForEnergy blog, 22.3.2018, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 16.10.2018): <https://fortumforenergyblog.wordpress.com/2018/03/22/sahkojarjestelman-perusasioiden-aarella-osa-3-miten-kysyntajousto-toimii-saatovoimana/>